



Il a été tiré de cet ouvrage sur papier pur fil des papeteries Lafuma à Voiron :

200 exemplaires numérotés de 1 à 200 dans le format in-4° raisin, texte et hors-texte réimposés avec double état des planches en couleurs dont un avant la lettre sur papier de Rives; et dans chaque volume un frontispice en couleur dessiné spécialement pour ces exemplaires;

1000 exemplaires numérotés de 201 à 1200 dans le format in-4° carré, avec deux tirages des planches en couleurs dont un avant la lettre.

HISTOIRE
DE LA
NATION FRANÇAISE



Digitized by the Internet Archive
in 2019 with funding from
Kahle/Austin Foundation

<https://archive.org/details/histoiredelanati0014hano>

GABRIEL HANOTAUX

DE L'ACADÉMIE FRANÇAISE

HISTOIRE
DE LA
NATION FRANÇAISE

TOME XIV .

HISTOIRE DES SCIENCES EN FRANCE

PREMIER VOLUME

INTRODUCTION GÉNÉRALE

PAR

ÉMILE PICARD

SECRÉTAIRE PERPÉTUEL DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES

MATHÉMATIQUES, MÉCANIQUE, ASTRONOMIE
PHYSIQUE ET CHIMIE

PAR

HENRI ANDOYER

DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES

PIERRE HUMBERT

PROFESSEUR A L'UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

CHARLES FABRY

PROFESSEUR A LA SORBONNE

ALBERT COLSON

PROFESSEUR A L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE

ILLUSTRATIONS DE B. MESTCHERSKY



PARIS

SOCIÉTÉ DE

LIBRAIRIE PLON

L'HISTOIRE NATIONALE | PLON-NOURRIT ET C^{le}

8, rue Garancière — 6°

DC 3B H3 v. 14

HISTOIRE DES SCIENCES EN FRANCE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

PAR

ÉMILE PICARD

SECRÉTAIRE PERPÉTUEL DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES





INTRODUCTION

A L'HISTOIRE DES SCIENCES

PAR

ÉMILE PICARD



Ce n'est pas une entreprise facile que d'écrire l'histoire des sciences mathématiques, physiques et naturelles. On rencontre à ce sujet dans trop de livres beaucoup de légendes, ainsi que de fausses attributions et des silences parfois intentionnels. Le travail scientifique est en grande partie un travail collectif, et l'éclosion des idées en apparence les plus originales n'est souvent que l'aboutissement de longs efforts antérieurs. Aussi les difficultés sont-elles grandes de rendre à chacun la justice qui lui est due, en s'efforçant de rattacher à un nom les découvertes ou les doctrines importantes ; même pour des temps récents, il faut parfois une grande sagacité et des recherches pénétrantes pour retrouver les premières traces d'une idée appelée à un grand avenir.

On peut envisager l'histoire des sciences à un autre point de vue, en se préoccupant surtout de tracer un tableau fidèle de l'évolution historique de la science, s'intéressant moins aux hommes qu'aux méthodes et aux résultats. Dans cet ouvrage consacré à l'histoire de France, il ne pouvait être question de se placer systématiquement à un seul de ces points de vue. On s'y est proposé de donner un tableau



LES PÂTRES DE LA CHALDÉE OBSERVANT LES ASTRES

exact du développement scientifique des derniers siècles, en s'attachant surtout aux savants français et à leur œuvre, de manière à montrer le rôle de notre pays dans l'édification de la science moderne. Le lecteur jugera si, comme nous le croyons, ceux qui ont bien voulu accepter cette tâche y ont réussi. Je ne veux dans cette introduction que présenter quelques remarques générales sur la genèse des idées scientifiques et sur le rôle des théories, résumant l'impression qui se dégage, semble-t-il, des chapitres qui vont suivre.

I

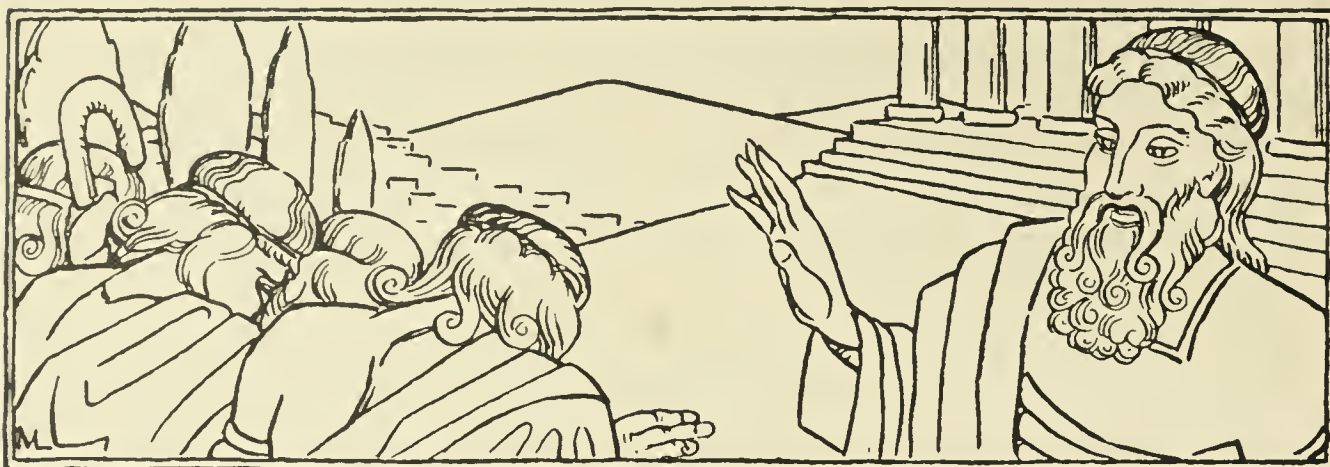
De très bonne heure, l'humanité dut compter des esprits plus attentifs que leurs congénères à l'observation des phénomènes courants : ce furent les premiers savants. Ce sont ces « savants » qui ont allumé les premiers feux et enseigné à fabriquer les instruments des âges préhistoriques. Un sentiment de curiosité désintéressée se mêlait-il aux buts pratiques qu'il voulait atteindre ? On peut soutenir que, dans ces temps reculés, l'art a toujours été surajouté à l'utile, comme tendent à le faire croire les dessins et les sculptures des temps paléolithiques, où sont retracés d'un trait si sûr les mouvements des animaux familiers. Mais ce que nous pouvons présumer de la science préhistorique se réduira toujours à peu de chose. L'hypothèse a été émise que nos notions de sens commun remontent aux temps lointains de la préhistoire. Il se peut que, dans l'humanité, de très anciennes façons de penser aient survécu, malgré tous les changements postérieurs survenus dans les condi-

tions des hommes. Dans son livre sur *le Pragmatisme*, William James adopte cette thèse que nos conceptions fondamentales sur les choses sont des découvertes faites par certains de nos ancêtres à des époques extrêmement éloignées, et qui ont réussi à se maintenir à travers tous les siècles postérieurs ; ces conceptions forment le stade du sens commun. Ainsi auraient pris naissance les concepts de *chose*, de *temps*, de *espace*, de *influences causales*, de *réel*, et bien d'autres suivant lesquels nous continuons à penser.

C'est avec les anciennes civilisations de la Chaldée et de l'Égypte que commence l'histoire de la science. La géométrie y eut un caractère expérimental. On enseignait à Babylone que le côté de l'hexagone régulier est égal au rayon ; c'était là sans doute un fait d'observation. La géométrie cultivée en Égypte n'était pas moins empirique. Les arpenteurs de la vallée du Nil avaient remarqué qu'un triangle dont les côtés sont proportionnels aux nombres *trois*, *quatre* et *cinq* est rectangle, et c'est en utilisant cette propriété qu'ils élevaient des perpendiculaires. La géométrie égyptienne apparaît aux historiens de la science comme un ensemble de règles pratiques, dont l'origine est d'ailleurs parfois difficile à deviner. Cette mathématique préscientifique ne doit pas cependant être méprisée, car les faits mathématiques et astronomiques, dont la connaissance est due aux Égyptiens et aux Chaldéens, ont été le point de départ indispensable pour les spéculations ultérieures.

Si on veut trouver une science plus spéculative et des vues générales sur l'univers, il faut les chercher dans les sanctuaires où s'élaboraient des cosmogonies, qui furent, dans leur temps, de véritables théories. L'action des dieux et des esprits y remplace sans doute les forces naturelles, mais il serait injuste de ne pas reconnaître l'effort de coordination et de sélection dont elles témoignent. Ces cosmogonies qui, une fois invariablement fixées, ont pu être un embarras pour le développement ultérieur de la pensée scientifique, ont constitué à leurs débuts un réel progrès.

On fait généralement honneur aux Grecs d'avoir créé la science rationnelle et désintéressée : c'est le miracle grec dont aimait à parler Ernest Renan. Nous croyons moins aujourd'hui à ces discontinuités. Quand les physiciens d'Ionie spéculaient sur les principes des choses, ils continuaient le travail de simplification et de réduction dont les religions orientales et surtout la religion égyptienne nous donnent des exemples. Nous pouvons nous représenter Thalès de Milet et surtout Anaximandre et Anaximène comme achevant « une laïcisation » commencée bien des siècles auparavant.



« QUE PERSONNE N'ENTRE ICI S'IL N'EST GÉOMÈTRE » (Platon).

Elles marquent une date dans l'histoire de l'esprit humain, ces spéculations, à la fois ambitieuses et naïves, où tout est ramené à quelques substances, et où le mouvement apparaît comme un facteur essentiel ; la science grecque à ses débuts eut toutes les audaces. Le point capital à noter est que la science rationnelle, dès ses premiers pas, cherche une explication de tous les phénomènes naturels en partant d'un petit nombre de principes. Si prématurée que fut une telle tentative, un but apparaissait dont la vision devait exercer, indirectement au moins, une grande influence sur le développement de la science positive.

Le merveilleux essor pris chez les Grecs par les sciences mathématiques eut une importance plus grande encore. Au nom de Pythagore se rattache l'explication de toutes choses par les nombres, et une formule célèbre de l'école pythagoricienne, qui était toute une métaphysique, proclamait que « les choses sont nombres ». Les progrès incessants de la géométrie pendant plusieurs siècles en firent le type idéal de la science, où tout est d'une intelligibilité parfaite, ce qui faisait écrire à Platon sur la porte de son école : « Que personne n'entre ici s'il n'est géomètre. » Il paraissait naturel aux Grecs que l'instrument géométrique fût utilisé pour une connaissance générale de l'univers, et, sous l'influence d'un esprit épris de clarté et simplifiant tout pour tout comprendre, la science positive tendait à prendre la forme mathématique.

Dans la philosophie et la science hellènes, simplicité, intelligibilité et vérité se montrent indissolublement liées. Il faut y joindre la beauté, le plus bel arrangement des choses étant aussi, d'après les pythagoriciens, le plus vrai. La physique et la cosmologie des Grecs furent œuvres d'artistes et de poètes, en même temps que de savants. Quoiqu'elle soit à bien des égards loin de la science hellène, la science

moderne a plus d'un point de contact avec l'esprit grec dans le maniement de ses hypothèses et de ses théories.

Nous n'avons pas parlé de la science expérimentale en Grèce. Si les Grecs ont peu expérimenté, il y eut parmi eux d'excellents observateurs, comme en témoignent assez l'œuvre immense d'Aristote en zoologie et antérieurement les fines observations d'Hippocrate. Il faut noter d'ailleurs que la science positive se désintéresse peu à peu des théories philosophiques. Rien ne nous fait connaître sur ce sujet les opinions du plus grand géomètre de l'antiquité, Archimède, qui doit compter parmi les fondateurs du calcul infinitésimal. Les profondes études du géomètre de Syracuse sur la mécanique nous le montrent, par contre, préoccupé des applications pratiques qu'avait souvent dédaignées dans les siècles précédents un amour ardent pour les spéculations métaphysiques. Avec Erathosthène et Hipparque, les applications de la géométrie à l'astronomie prennent le plus brillant essor. Auparavant, du temps même d'Aristote, Héraclide du Pont avait été probablement le véritable précurseur de Copernic ; il est, en tout cas, certain qu'Aristarque de Samos, cinquante ans après Héraclide, soutenait dans son intégrité le système du grand Polonais, mais sa tentative tomba dans l'oubli pendant de longs siècles.

Cette excursion rapide à travers l'antiquité depuis les plus anciens âges suffit à mettre en évidence les tendances pratiques et théoriques, qui, suivant les époques, se sont développées relativement à l'objet même de la science. Aujourd'hui encore, ces divers points de vue concourent à former l'opinion que nous nous faisons de la science. Comme le dit Montaigne, « c'est un grand ornement que la science », et il ajoute aussitôt : « c'est un outil de merveilleux service », c'est-à-dire que le beau et l'utile s'y rejoignent et sont inséparables. Quant au désir de connaître le vrai, il faut ici faire une distinction que l'antiquité et le moyen âge n'ont pas ignorée, en séparant parfois la physique positive de la métaphysique du monde matériel, comme il arriva aux écoles astronomiques, où l'astronome ne se proposait pas de rechercher l'essence du ciel et des astres, mais se préoccupait seulement de l'ordre des corps célestes, de leurs figures et de leurs distances. Son but était atteint quand ses constructions assignaient à chaque astre errant une marche conforme à celle que relèvent les observations. Il ne s'agissait pas pour lui de donner des apparences une explication conforme à la réalité ; il voulait seulement *sauver les phénomènes*, σώζειν τὰ φαινόμενα, suivant une expression qui remonte à Platon. Nous retrouverons ces vues sous des formes à peine différentes, quand nous chercherons à préciser le rôle des théories dans la science actuelle.

II

Jetons maintenant un coup d'œil sur les principales tendances qui se manifestent dans les âges modernes quant au but et à la valeur de la science.

On doit tout d'abord reconnaître que l'importance prise par la science dans la société actuelle provient avant tout des services qu'elle rend à l'humanité. Le plus grand nombre considère, suivant le mot de Bacon, que la science et la puissance humaine se correspondent et vont au même but. On admire surtout dans la science le merveilleux spectacle des applications si variées qui ont tant modifié les conditions d'existence des peuples civilisés : c'est un genre de valeur aisément appréciable. Il y a même un danger dans ces constatations trop faciles, qui risquent de faire perdre de vue les rapports qui existent entre ces brillantes manifestations de l'activité humaine et la science théorique et désintéressée. La source tarirait promptement si un esprit exclusivement utilitaire venait à dominer dans nos sociétés trop préoccupées de jouissances immédiates. Aujourd'hui comme jadis, la dépendance est intime entre la science pure et les applications. Ces influences réciproques ont agi dans l'un et l'autre sens, la pratique conduisant ici à la spéculation, tandis que des vues théoriques ont été ailleurs l'origine de recherches pratiques. Il suffira de rappeler quelques exemples mémorables pris dans le dix-neuvième siècle. Dans son immortel ouvrage sur *la Puissance motrice du feu*, Sadi Carnot, en se proposant d'expliquer et d'étendre les services que peuvent rendre les machines à feu, a créé la thermodynamique, d'où est née l'énergétique moderne. De même les travaux de Henri Sainte-Claire Deville sur le platine ont été l'origine de ses recherches sur la dissociation d'où devait sortir la mécanique chimique. D'autre part, Newton, en écrivant le livre des *Principes de la philosophie naturelle*, ne pensait guère aux navigateurs qui devaient plus tard utiliser quelque *Connaissance des temps*, construite d'après les lois de la gravitation universelle. Pareillement, Ampère et Faraday, en étudiant les actions des courants sur les courants et les phénomènes d'induction, préparaient à leur insu la voie à la construction des puissantes machines électromagnétiques, dont l'emploi a révolutionné tant d'industries.

Quelle que puisse être dans chaque cas l'origine des progrès matériels réalisés par la science, celle-ci apparaît de plus en plus comme une puissance formidable qui ne recule jamais, et dont les conquêtes sont définitives. Il semble que tout lui soit

possible, et on doit reconnaître que les admirables découvertes faites depuis trois siècles autorisent des espérances pour ainsi dire illimitées. On les cite souvent comme exemples des progrès de la civilisation. Mais il faut cependant éviter de graves confusions. Parmi les progrès de la civilisation entendue au sens le plus large et le plus humain figurent aussi les progrès de la moralité, et l'on ne doit pas oublier que la science et la moralité sont loin de progresser de pair. Ainsi le sentiment de l'honneur et le respect de la parole donnée n'ont pas de commune mesure avec la connaissance des lois relatives à la compressibilité des gaz et à l'action des aimants sur les courants électriques. Les sciences peuvent contribuer au bien-être de l'humanité ainsi qu'au soulagement de ses misères ; mais elles sont aussi susceptibles de concourir à des buts criminels, comme on n'en a vu que trop d'exemples il y a quelques années.

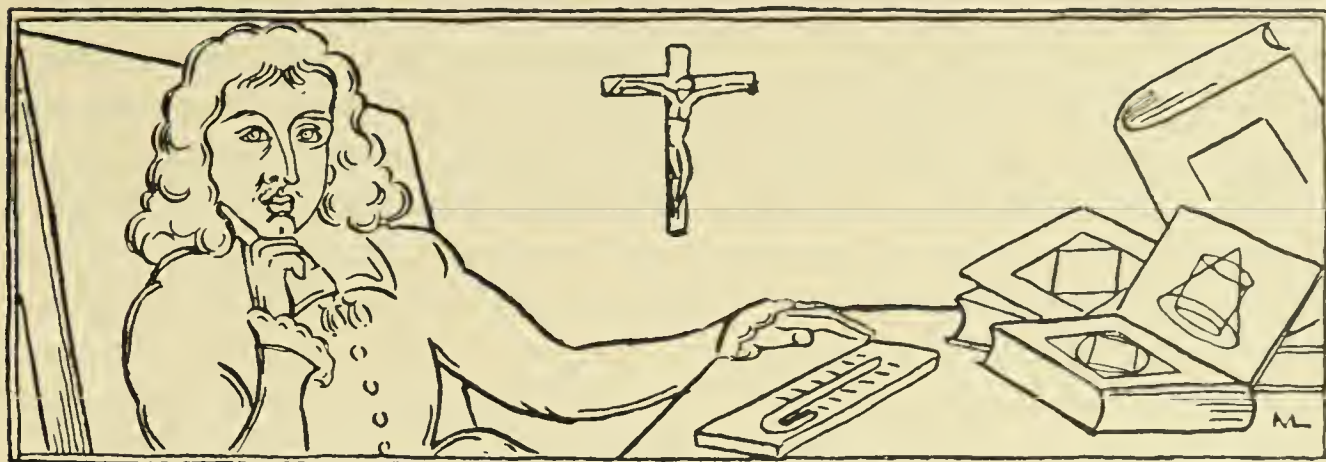
Je me hâte d'ajouter que ceux qui croient le moins à une influence profonde de la culture scientifique sur la valeur morale aiment à penser que, au moins pour les savants qui la font progresser, la science est autre chose qu'un outil de merveilleux service, et que l'habitude de la méditation constante sur la philosophie naturelle incline l'esprit à la sérénité et à la modestie, car l'homme de science plus que tout autre connaît la grandeur de ses ignorances. On a plaisir aussi à constater que certains savants, surajoutant en quelque sorte un élément moral, rêvent d'une alliance entre le vrai et le bien et ne séparent pas la science de ses fins bienfaisantes ; tel fut le cas de notre grand Pasteur, chez qui l'on rencontre à un degré si éminent l'enthousiasme scientifique et le haut sentiment des devoirs du savant envers la patrie et envers l'humanité.

Il faut aussi reconnaître que la diffusion des connaissances scientifiques modifie peu à peu la mentalité de ceux qui se piquent le moins de curiosité philosophique. L'idée profonde de loi naturelle s'implante peu à peu dans des esprits qui ne voyaient d'abord dans la science qu'une possibilité d'accroître notre puissance sur les choses. Le nombre augmente de ceux pour lesquels le point de vue utilitaire est dépassé, et qui, à la découverte d'un phénomène ou d'un corps nouveau, ne se demandent pas uniquement à quoi cela pourrait servir. L'astronomie à cet égard est une des sciences les plus captivantes. L'attrait est grand de contempler quelque temps l'univers du point de vue de Sirius, ou de se transporter plus loin encore par la pensée dans ces mondes lointains qu'on appelle les nébuleuses spirales, et dont la lumière met des centaines de milliers d'années à nous parvenir, voyageant à raison de trois cent mille kilomètres par seconde. Si l'on a pu parfois faire le procès de certaines utilités créées par la science, en lui reprochant d'augmenter nos désirs

au détriment de notre bonheur, et dire avec l'Ecclésiaste que celui qui augmente sa science augmente sa douleur, il est au contraire des heures, où on voit se dégager de la connaissance scientifique des idées de beauté et d'harmonie qui élèvent l'homme au-dessus d'intérêts immédiats et concourent en quelque manière au développement de la moralité. On peut enfin espérer que les progrès des sciences, en apprenant à mieux utiliser les énergies naturelles et à en découvrir de nouvelles, contribueront pour une large part à la solution des problèmes sociaux qui sont une des grandes préoccupations de notre temps. De ce point de vue optimiste, la science nous apparaît encore comme bonne en même temps qu'utile : c'est une pensée fortifiante pour ceux qui lui consacrent leur vie.

Un système de concepts, associé à des lois ou faits particuliers et transformés par des déductions convenables, de façon à faire rentrer moyennant certaines hypothèses ces lois ou faits dans des cadres plus généraux, constitue une théorie scientifique. Dans les diverses sciences, le développement des théories prend des formes différentes et nous aurons à revenir sur ce point. On peut remarquer d'une manière générale, qu'on exige d'une théorie qu'elle soit simple. Il y a là une notion aussi féconde que vague ; ce principe de simplicité, malgré son caractère hypothétique, tend à produire en nous un sentiment de certitude. Devant une loi simple, nous croyons moins à la possibilité d'une erreur. Sans doute, comme le disait un jour Fresnel à Laplace, la nature se joue de nos difficultés analytiques, mais les savants ne sont satisfaits que quand ils peuvent rattacher des relations complexes à quelque idée théorique simplement formulée ; quand il en est autrement, les lois sont traitées d'empiriques. Le principe de simplicité intervient notamment, quand, plusieurs théories pouvant rendre compte d'un même groupe de phénomènes, nous rejetons une théorie trop compliquée ; peut-être parce que, étant trop difficile à manier, nous la jugeons peu utile.

Ce qu'on doit entendre par explication scientifique a donné lieu à bien des controverses. Une question voisine concerne l'intelligence d'un phénomène. Devant un fait nouveau, il nous arrive de dire que nous comprenons, ou que nous ne comprenons pas. Que signifie cette assertion ? Beaucoup de savants estiment qu'ils comprennent un phénomène, quand, avec les notions antérieures acquises, ils auraient pu le prévoir ; l'explication consiste à développer cette possibilité de précision. On peut d'ailleurs être plus ou moins exigeant quant à la nature des lois ou des théories à invoquer dans une explication. Les exigences varient d'une science à l'autre ; elles ne sont pas les mêmes pour un physicien et pour un biologiste. Alors que les sciences physico-chimiques tendent de plus en plus à prendre une forme mathématique, les sciences biologiques se présentent en général avec un autre



LA MÉDITATION DE PASCAL

caractère. Elles sont à un stade moins avancé, avec des concepts moins élaborés. Aussi ne doit-on pas s'étonner que, dans certaines théories zoologiques, la méthode soit autre que dans les sciences physiques. Elle a souvent un caractère comparatif et historique ; son maniement demande des habitudes d'esprit quelque peu différentes de celles habituelles aux savants qui sont adonnés aux sciences entrées dans une période plus quantitative.

III

Toute la suite de cette histoire montrera le rôle important joué par la France dans le développement scientifique. Résumons-le rapidement, en indiquant seulement les voies nouvelles dans lesquelles la science s'est successivement engagée.

En ce qui concerne le moyen âge, Duhem a insisté dans des ouvrages très documentés sur l'éclat dont a brillé l'Université de Paris aux quatorzième et quinzième siècles, époque de vie intellectuelle intense, où l'influence des doctrines parisiennes fut considérable sur les enseignements des Universités d'Allemagne, d'Angleterre, d'Italie et d'Espagne. On doit d'après lui, compter Jean Buridan, recteur de l'Université de Paris dès 1327, parmi les fondateurs de la dynamique moderne. La dynamique n'avait joué jusque-là aucun rôle dans la notoriété de Buridan, et, sans parler de la Tour de Nesle, son nom rappelle seulement l'argument relatif à la liberté d'indifférence, dont d'ailleurs on ne trouve pas trace dans ses écrits. Il ne paraît pas douteux, d'après l'exposé que fait Duhem de la dynamique de Buridan en suivant un manuscrit du fonds latin de la Bibliothèque nationale, que Buridan avait rompu

avec la mécanique péripatéticienne, et il semble bien que, avec sa théorie de l'*impetus*, il s'éleva à la loi de l'inertie, osant proclamer inutiles les intelligences motrices des orbes célestes, qui jouaient un rôle si important dans la physique d'Aristote. Parmi les disciples de Buridan, figure au premier rang Nicole Oresme, grand-maître du collège de Navarre en 1356, et plus tard évêque de Lisieux, dont l'influence a été considérable : Oresme fut à la fois un précurseur de Copernic par les vues qu'il émit sur la terre et les planètes, et de Descartes par l'usage qu'il fit des principes essentiels de la géométrie analytique.

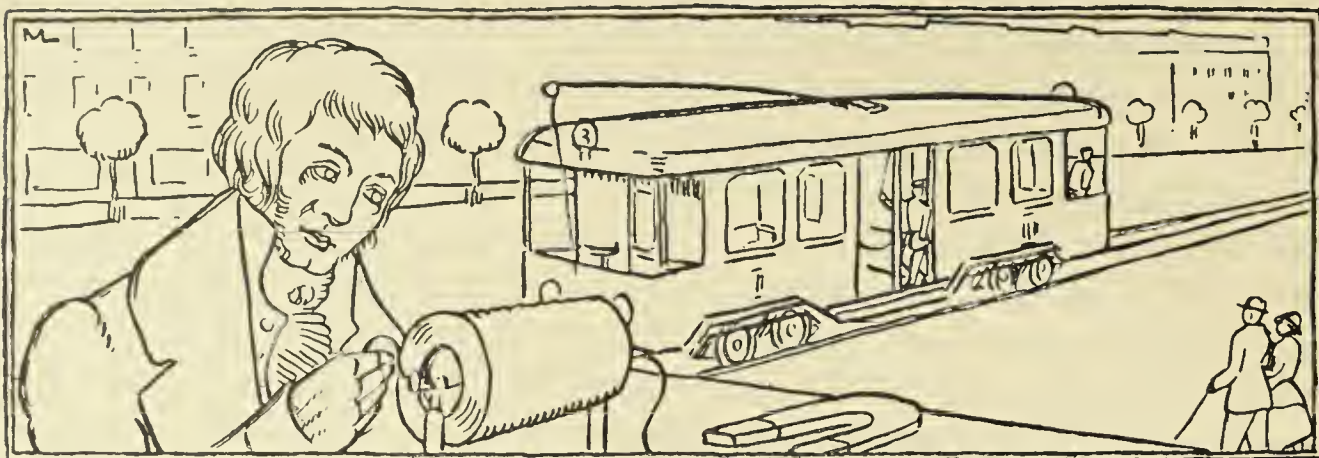
A la Renaissance et au début du dix-septième siècle, nous voyons l'algèbre proprement dite arriver à l'autonomie avec son symbolisme et ses notations de plus en plus perfectionnés, constituant une langue d'une admirable clarté, qui, suivant le mot de Fourier, n'a pas de signe pour exprimer les notions confuses, et procure à la pensée une véritable économie. Les bonnes notations, tout le monde en convient, sont souvent indispensables pour arriver à la solution des problèmes posés ; on peut même aller plus loin, et dire qu'elles conduisent parfois à poser de nouveaux problèmes, l'esprit étant soutenu et porté en avant par les symboles qu'il a créés. Au nom de Viète est attachée la création de l'algèbre moderne, dont l'honneur lui appartient sans conteste ; l'analyse infinitésimale sera en fait le développement de ce symbolisme opératoire.

Dans la première moitié du dix-septième siècle, la France peut revendiquer avec orgueil les noms de Pascal, de Descartes et de Fermat. On connaît la précocité de Pascal s'essayant tout enfant à des recherches géométriques et publiant à seize ans un court *Essay pour les coniques*, où il témoigne de la puissance d'invention d'un grand géomètre. Pascal est avec Fermat le fondateur du calcul des probabilités ; Huygens, Leibniz et d'autres ne feront que développer et appliquer leurs principes, jusqu'à ce que Jacques Bernoulli découvre le célèbre théorème qui porte son nom, et que Poisson a généralisé un siècle plus tard en l'appelant la loi des grands nombres. L'ouvrage de Pascal sur *les Problèmes touchant la roulette* permet de le regarder comme un des fondateurs du calcul intégral. Le rôle de l'illustre enfant de Clermont ne fut pas moindre en physique qu'en mathématiques pures. C'est à l'expérience et non à des dissertations stériles que Pascal demande des réponses aux questions posées par l'expérience célèbre de Torricelli sur le baromètre. La physique est avant tout pour lui une science expérimentale, et il insiste sur ce que l'expérience et l'observation sont la seule source de nos connaissances. « Que tous les disciples d'Aristote, écrit-il dans la conclusion de ses *Traité sur le vide et sur la pesanteur de l'air*, rassemblent tout ce qu'il y a de fort dans les écrits de leur maître

et de ses commentateurs pour rendre raison de ces choses par l'horreur du vuide, si ils le peuvent ; sinon qu'ils reconnaissent que les expériences sont les véritables maîtres qu'il faut suivre dans la physique ». Pour Pascal, la physique ne peut être réduite à une mathématique universelle, et la tendance cartésienne lui paraissait trop audacieuse de chercher l'essence de la matière. Ce contraste entre la pensée d'un Pascal et celle d'un Descartes est singulièrement intéressant. Jamais esprits ne furent plus dissemblables et moins faits pour se comprendre. On peut dire que, dans sa vision de la science, Pascal a montré trop de prudence, et Descartes a fait preuve de trop d'audace. Certes, plus d'un savant sourit aujourd'hui de l'assurance avec laquelle Descartes trouvait des explications pour toutes choses, et cependant cette foi et cette confiance ont été merveilleusement fécondes. Comme l'a dit Claude Bernard, « pour faire la science, il faut croire à la science » A l'inverse de Pascal s'attachant aux résultats particuliers, Descartes se préoccupait surtout de la *méthode*, et c'est par là qu'il est un des créateurs de la philosophie naturelle. Devancé en partie par Nicole Oresme dans la découverte de la géométrie analytique, il apporte des vues générales sur l'algèbre et ses applications. On a cherché parfois à rabaisser son rôle en mécanique. C'est oublier qu'il a le premier énoncé la loi d'inertie sous une forme précise, et qu'il a vu le premier dans la notion de *travail* le concept fondamental de la mécanique. On sait que Leibniz a rectifié certaines erreurs de Descartes sur les quantités de mouvement, mais il n'en reste pas moins que, en mécanique comme en philosophie, Leibniz est un disciple du philosophe français.

En même temps qu'à Pascal et à Descartes, les mathématiciens et les physiciens doivent apporter à Fermat leur tribut d'admiration. Parmi les savants du dix-septième siècle, la physionomie de Fermat est particulièrement attachante. Le nom du Conseiller au Parlement de Toulouse reste à jamais inscrit dans l'histoire du calcul infinitésimal à côté de celui de Pascal. Laplace et Lagrange le regardaient avec raison comme le premier inventeur des nouveaux calculs pour sa méthode de *maximis et minimis*, où il introduit en fait la notion de *dérivée*. Ses merveilleuses divinations sur la théorie des nombres font l'admiration des amis de l'arithmétique, cette reine des mathématiques, comme dira plus tard le mathématicien allemand Gauss. L'optique est aussi redevable à Fermat d'un progrès considérable. Il a trouvé la raison de la réfraction dans un principe général, d'après lequel la nature agit *par les voies les plus courtes et les plus aisées*; c'est donc à lui que l'on doit la première notion de *principe de la moindre action*, qui joue aujourd'hui un si grand rôle dans tant de questions de philosophie naturelle.

Après Descartes, Pascal et Fermat, l'hégémonie scientifique passe pendant près



AMPÈRE ÉTUDIE L'ACTION DES COURANTS SUR LES COURANTS

d'un siècle à l'étranger, avec Huygens et Newton, qui posent définitivement les principes de la dynamique ; Newton fait de ceux-ci une admirable application, en écrivant dans son livre des *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, le premier chapitre de la mécanique céleste. A cette période d'induction succède une période déductive où la France reprend le premier rang ; le développement mathématique y joue un rôle essentiel, et il faut rattacher surtout à cette époque les travaux de d'Alembert et de Lagrange. Les applications viennent ensuite, nombreuses. Quelles riches moissons en astronomie théorique rappellent les noms de ces grands géomètres et ceux de Clairaut et de Laplace. Newton mis à part et hors rang, on peut dire que la mécanique céleste est alors une science presque uniquement française.

Le dix-septième et dix-huitième siècles virent presque toujours les mathématiques et leurs applications cultivées par les mêmes savants. Il devait arriver un moment où des spécialisations s'établiraient. En France, trois noms dominent dans les sciences mathématiques pendant le premier tiers du dix-neuvième siècle : ce sont ceux de Fourier, de Cauchy et de Galois. L'ouvrage de Fourier sur la théorie analytique de la chaleur contient le germe des méthodes employées dans l'étude des équations auxquelles conduisent de nombreuses théories physiques. L'activité de Cauchy, qui fut à la fois un grand théoricien de la physique et de la mécanique et un inventeur de génie en mathématiques pures, a été prodigieuse. En créant la théorie des fonctions de variables complexes, il donna une vie nouvelle à l'analyse mathématique, et, en ce sens, les travaux les plus modernes relèvent de lui. Evariste Galois transforma la théorie des équations algébriques, en montrant qu'à chaque équation, correspond un groupe de substitutions, dans lequel se reflètent ses caractères essentiels ; d'ailleurs, les notions qu'il introduisit dépassent de beau-

coup le domaine de l'algèbre et s'étendent au concept de groupe d'opérations dans son acception la plus étendue.

Pendant la première moitié du dix-neuvième siècle, la physique française brille du plus vif éclat. En physique générale, deux principes dominant la science de l'énergie. Sous leur forme thermodynamique, le premier principe ou principe de l'équivalence de la chaleur et du travail est attribué généralement au médecin allemand Robert Mayer, qui le formula en 1843 ; le second, concernant la dégradation de l'énergie, est le principe de Carnot. Mais l'histoire du premier de ces principes doit être révisée. Dès 1829, Sadi Carnot, modifiant ses vues sur le calorique, avait nettement indiqué le principe d'équivalence dans des notes trouvées après sa mort survenue en 1832, mais qui ne furent publiées que longtemps après. Il est donc légitime de regarder Sadi Carnot (qui était le fils aîné de Lazare Carnot) comme le créateur de la thermodynamique. En fait, comme l'a dit un bon juge, lord Kelvin, « dans toute l'étendue des sciences, il n'y a rien de plus grand que l'œuvre de Sadi Carnot ». On ne doit pas oublier non plus que dans l'ouvrage sur les chemins de fer publié en 1839, c'est-à-dire quatre ans avant Mayer, par Marc Séguin, l'inventeur des chaudières tubulaires, on rencontre des vues précises sur l'équivalence de la chaleur et du travail et sur le principe de la conservation de l'énergie.

Le grand nom de Fresnel domine tout ce qui concerne l'optique ondulatoire. Quels merveilleux chapitres de la physique que ceux de l'optique des interférences et de la polarisation, où des physiciens français, comme Malus, Arago, Fresnel, Biot, Fizeau et leurs successeurs, ont fait de si remarquables découvertes.

En électricité, les lois de Coulomb sur les actions électriques à l'état statique sont restées classiques, et Ampère a pu être appelé le Newton de l'électrodynamique pour ses célèbres études sur l'action des courants sur les courants.

La chimie moderne est née dans la seconde moitié du dix-huitième siècle. Lavoisier occupe dans sa fondation une place à part. Un grand nombre de faits avaient été accumulés antérieurement, et tout récemment la découverte des principaux gaz, hydrogène, oxygène, azote, chlore, venait d'être effectuée. Lavoisier prend tous ces résultats comme point de départ de ses expériences et, en les interprétant convenablement, pose les bases de la chimie moderne. Toute son œuvre offre des exemples mémorables de rigueur dans la critique et de précision dans les mesures, et sa manière d'envisager la combustion en général constitue une véritable révolution scientifique. Il doit aussi être compté parmi les maîtres de la physiologie, pour avoir assimilé la respiration pulmonaire à une combustion.

Gay-Lussac et Dumas contribuent à l'établissement des lois générales de la



PASTEUR ÉTUDIANT LA RAGE

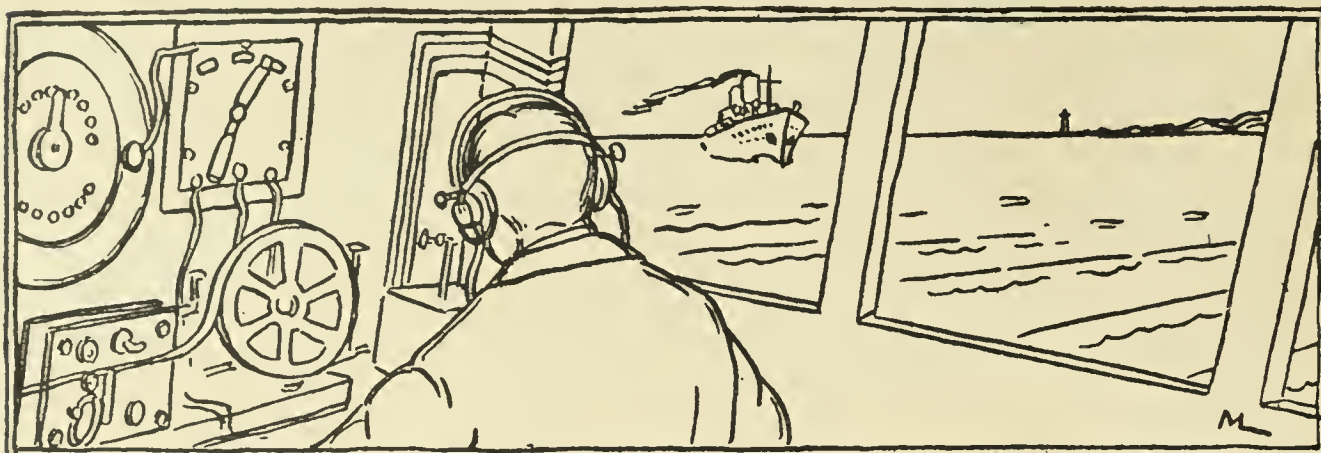
chimie. La mécanique chimique et la chimie physique trouvent leur origine dans la statique chimique de Berthollet montrant que dans les réactions chimiques il faut tenir compte des conditions physiques, et Dulong établissait ensuite que, dans la décomposition des sels, peut intervenir la masse des réactifs. Puis viennent les travaux de Berthelot sur l'éthérification et de Sainte-Claire Deville sur la dissociation. Depuis lors, les notions ainsi acquises d'équilibre chimique et de transformations réversibles ont été l'objet d'un nombre immense de recherches, tant théoriques qu'expérimentales. Ainsi les barrières s'abaissent chaque jour entre la physique et la chimie. On n'en peut pas citer d'exemple plus mémorable que cet ensemble admirable de recherches sur les substances radio-actives, auxquelles sont attachés les noms de Henri Becquerel et de M. et Mme Curie, recherches qui se rapportent à la fois à la physique et à la chimie, et ont été l'origine des théories les plus profondes développées récemment sur la constitution de la matière.

Dans les sciences naturelles, l'orientation des recherches a été changée depuis Lamarck et Darwin. Sans vouloir rabaisser ce dernier, qui fut un grand naturaliste, on peut trouver que la doctrine du premier est autrement vaste. Depuis eux, la biologie tout entière est dominée par l'idée d'évolution, idée théorique sans doute et dont les modes d'application ont soulevé bien des controverses, mais qui s'est montrée extrêmement féconde. Rappelons encore que Bichat a fondé l'anatomie générale et a été le créateur de la science des tissus. Quant à Claude Bernard, on a pu dire de lui qu'il fut la physiologie elle-même. C'est surtout à lui que la physiologie est redevable de la démonstration de la nature physico-chimique des actes élémentaires de l'organisme, et un de ses plus beaux titres de gloire est d'avoir créé la physiologie cellulaire, base principale de la physiologie générale. En histoire

naturelle, les travaux de Cuvier sur l'anatomie comparée, sur les ossements fossiles et sur la distribution du règne animal d'après son organisation, ont transformé les sciences zoologiques, et le souvenir est resté des débats célèbres entre Cuvier et un autre grand naturaliste du siècle dernier, Étienne Geoffroy Saint-Hilaire, fondateur de l'embryogénie. Il suffira de rappeler ici le nom de Pasteur, dont les travaux sur les fermentations ont orienté la biologie dans des voies inattendues, et dont l'œuvre a en médecine des prolongements indéfinis. Dans le domaine de la biologie, Claude Bernard et Pasteur brillent au premier rang, et sont l'honneur de la science française.

IV

Nous devons, en terminant, compléter ce que nous avons dit dans la seconde partie de cette préface sur les hypothèses et les théories scientifiques. On a quelquefois opposé, d'une part, les partisans de la doctrine énergétique, formant les équations générales relatives aux transformations d'un système matériel, sans en connaître la constitution autrement que par les variables, susceptibles d'être observées, au moyen desquelles on peut le définir, et, d'autre part, les esprits désireux d'explications mécaniques et curieux du détail intime des phénomènes. Les seconds veulent ouvrir la montre qui est devant eux, tandis que les premiers se contentent de suivre le mouvement des aiguilles. Cette opposition est ancienne ; qu'il suffise de rappeler la phrase de Pascal : « Il faut dire en gros, cela se fait par figure et mouvement, car cela est vrai, mais de dire quels et composer la machine, cela est ridicule ; car cela est inutile, et incertain, et pénible. » Et le plus résolu des énergétistes, Pierre Duhem, a écrit : « Une théorie physique n'est pas une explication : c'est un système de propositions mathématiques, qui ont pour but de représenter, aussi simplement, aussi complètement et aussi exactement que possible, un ensemble de lois expérimentales. » Le point de vue est étroit, mais, depuis un siècle, d'éminents physiciens, en s'y tenant, ont fait progresser la science, comme le montre assez le développement grandiose de la thermodynamique et de ses applications. Par contre, d'autres plus confiants se sont efforcés de démonter la machine. Ils ne craignent pas d'introduire, à côté des variables *visibles* que nous pouvons mesurer et sur lesquelles nous pouvons avoir une action directe, des variables *cachées* échappant à nos mesures. Quelque arbitraire qu'aient présenté souvent de telles constructions, on se priverait d'une arme



LA TÉLÉGRAPHIE SANS FIL

puissante, en renonçant à ces tentatives d'explications, qui sont un fécond instrument de recherches.

L'antagonisme fut parfois vif entre les deux points de vue. Nous jugeons mieux maintenant de ce qu'il faut demander aux hypothèses et aux théories, et nous avons moins de goût pour les querelles d'écoles où se plaisaient nos devanciers. On admet en général aujourd'hui que les théories ne se proposent pas de donner une explication causale de la réalité même, mais seulement de traduire celle-ci en images ou en symboles mathématiques. N'était-ce pas d'ailleurs ce que faisaient certaines écoles de l'antiquité, quand elles parlaient de *sauver les phénomènes*? On voit maintenant des ponts s'établir entre les tendances extrêmes radicalement opposées dans leur principe. Nous devons nous en féliciter ; car c'est en adoptant des points de vue divers, quelquefois opposés, que les sciences progressent.

Les théories de l'optique pourraient servir d'illustrations aux remarques qui précèdent. Il y a soixante ans, peu de savants doutaient de la réalité du fluide mystérieux qui était *l'éther* d'Huygens et de Fresnel, dont les vibrations produisent la lumière. La théorie de l'émission, à laquelle on rattachait le nom de Newton, était définitivement condamnée, et le système des ondulations triomphait. Lamé écrivait dans ses leçons sur l'élasticité : « L'existence du fluide éthéré est incontestablement démontrée par la propagation de la lumière dans les espaces planétaires, par l'explication si simple et si complète des phénomènes de la réfraction, et les lois de la double réfraction montrent avec non moins de certitude que l'éther existe dans les milieux diaphanes... » Et le grand physicien anglais lord Kelvin proclamait aussi : « L'éther n'est pas une création imaginaire du philosophe, il nous est aussi essentiel que l'air que nous respirons... »



LA MÉCANIQUE UNIVERSELLE

Un nombre immense de faits se sont trouvés expliqués par l'intervention de ce fluide subtil. A la vérité, des difficultés se présentèrent de bonne heure, quand on chercha à se rendre compte de sa nature, en faisant des comparaisons avec les milieux qui nous sont familiers, l'éther devant posséder à la fois les propriétés des fluides et celles des solides élastiques. A la suite des travaux théoriques de Maxwell, suivis des expériences de Hertz, on fut conduit à envisager autrement l'éther ; il ne fut plus qu'un champ de forces électrique et magnétique, et cessa d'être une substance ; c'est par métaphore que nous parlons d'ondes hertziennes, si une vibration exige une substance qui vibre. Sans parler d'autres avatars par lesquels passa l'éther, perdant même pour certains physiciens le peu d'existence qui lui restait, on peut juger par cet exemple de l'évolution qu'est susceptible de subir une théorie physique, et on comprend que, si certains tiennent à ce qu'une théorie fournisse des images ou des modèles de la réalité qu'ils puissent en quelque sorte toucher, d'autres jugent que la partie essentielle d'une théorie est le moule analytique dans lequel elle cherche à enfermer les choses. En lisant les travaux de certaines écoles modernes de physique mathématique, on évoque plus d'une fois le souvenir de la science hellène, pour laquelle le réel était en quelque sorte le monde sensible vu à travers les concepts de l'arithmétique et de la géométrie.

J'ai eu surtout en vue dans les remarques précédentes les sciences, comme la physique et la chimie, entrées dans ce que j'appelais plus haut la période mathématique, où le stade qualitatif est dépassé et où certaines prévisions numériques sont devenues possibles. Les sciences biologiques se présentent, en général, avec un autre caractère. Tandis que le nombre des éléments à introduire dans l'étude d'un phénomène physique est pratiquement assez restreint, il serait nécessaire d'intro-

duire un nombre immense des variables, si on voulait en biologie construire des théories du même type que les théories mécanistes de la physico-chimie. Le mécanisme proprement dit s'y présente avec d'énormes difficultés ; au contraire, les considérations globales de l'énergétique rendent, notamment en physiologie, les plus grands services. Il faut élargir aussi le sens du mot explication, la prévision étant rarement possible sous forme quantitative, et on doit souvent se borner à rendre compte du sens d'une évolution dont on ne peut préciser les causes. Il est clair, par exemple, que les théories transformistes ont un tout autre caractère que les théories de la physique et de la chimie, le point de vue initial renfermant une indétermination qui rend difficile d'en suivre les conséquences. L'hypothèse de l'évolution n'en est pas moins un admirable instrument de recherche et de travail ; elle a d'ailleurs pour elle qu'on ne peut concevoir une autre théorie scientifique qui la remplacerait utilement.

Après les développements qu'on vient de lire, il serait oiseux de nous demander si les progrès de la science nous ont mieux fait connaître le fond des choses ; elle restera, je crois, toujours vraie, cette phrase que le grand mathématicien *Galois* écrivait quelques heures avant sa mort prématurée : « La science est l'œuvre de l'esprit humain, qui est plutôt destiné à étudier qu'à connaître, à chercher qu'à trouver la vérité. » Mais il faut ajouter que les études et les recherches scientifiques nous conduisent à nous expliquer de mieux en mieux l'Univers. A ce travail participent avec une noble émulation les savants de tous les pays. La façon de poser notions et concepts peut différer parfois d'un peuple à un autre, de sorte que la science, en une certaine mesure, a un caractère national. Ainsi les mathématiciens français s'efforcent de maintenir un sage équilibre entre l'étude de théories purement formelles constituant une sorte de *métamathématique* et les applications de l'analyse mathématique à la géométrie, à la mécanique et à la physique. Beaucoup d'entre eux restent fidèles à la pensée de nos grands géomètres physiciens de la première moitié du siècle dernier, d'après laquelle nous avons besoin d'être guidés par des possibilités d'applications plus ou moins lointaines dans l'infinie variété des formes que conçoit notre esprit, de manière à ne pas aller à l'aventure. En physique et en chimie, le savant anglais préfère souvent les modèles mécaniques aux théories abstraites, et il suffit de rappeler à ce sujet les noms illustres de Faraday et de lord Kelvin ; on sait d'ailleurs que le goût des représentations figurées et d'une vision concrète des choses est une des caractéristiques de l'esprit anglais se souciant peu de l'unité logique. A l'opposé de la mentalité scientifique anglaise, on peut signaler certaines tendances de la science allemande posant *a priori* des notions



LA VOCATION SCIENTIFIQUE

et des concepts, et en suivant indéfiniment les conséquences sans se préoccuper de leur accord avec le réel, trouvant même un certain plaisir à s'éloigner du sens commun. La lecture de cette histoire laissera l'impression que la science, dans le pays de Pascal et de Descartes, a toujours gardé une position moyenne entre des tendances extrêmes. Il ne faut pas d'ailleurs regretter certaines différences par lesquelles chaque pays apporte dans l'œuvre commune ses qualités propres ; dans leur ensemble, elles ont été fécondes.

Tout en reconnaissant que les théories sont pour le chercheur un guide, sans lequel il n'y a le plus souvent qu'empirisme et rencontres fortuits de trouvailles heureuses, nous devons proclamer bien haut que l'art difficile de l'expérimentation tient dans les sciences de la nature la première place. Si l'on admire l'audace des conceptions théoriques développées dans les derniers siècles, on n'est pas moins émerveillé de la précision des mesures atteintes dans certaines parties de la science. On l'a dit très justement, les révolutions scientifiques ont eu pour point de départ des mesures faites avec la précision que leur époque permettait d'atteindre, et rien n'est plus définitivement fécond en science que le gain d'une décimale. C'est ce que montre l'histoire des sciences depuis les observations astronomiques de Tycho-Brahé, permettant à Kepler d'arriver aux lois du mouvement des planètes, jusqu'aux expériences délicates de l'optique, où l'on mesure des millièmes de milliè-nième de millimètre, qui ont permis d'édifier les théories modernes sur la structure des raies spectrales. Il convient aussi de ne pas établir une distinction trop profonde entre la science et la technique, où le technicien serait mis à un rang inférieur. De bonnes techniques ont été souvent l'origine d'importantes découvertes. Comme l'a remarqué Claude Bernard, la création d'une bonne technique ou d'un

bon instrument peut rendre plus de services à la science que le perfectionnement des hautes spéculations théoriques qui en sont les fondements rationnels.

Il résulte, semble-t-il, de tout ce qui précède que l'ensemble si varié des points de vue qui se présentent dans l'histoire des sciences a une valeur hautement éducative, et il est permis en terminant de souhaiter que, dans notre enseignement secondaire, quelque place soit, vers la fin des études, réservée à cette histoire trop négligée en France. L'histoire des sciences peut devenir un grand ferment de *vocation*; et c'est dans ce sens que l'œuvre présente est écrite : elle contribuera, peut-être, à mettre fin à l'espèce d'ostracisme qui frappait cet ordre de connaissance historique. Certes, on a glorifié la science dans de beaux discours, mais cette haute estime est restée le plus souvent purement verbale, et l'on ne s'est pas assez soucié de donner à notre jeunesse une vue nette et éducative sur l'objet et la valeur de la science. A bien des indices il semble que les temps commencent à changer. On s'accorde à reconnaître que certaines connaissances scientifiques sont nécessaires à une culture générale qui ne peut être aujourd'hui purement littéraire, et il commence à apparaître que l'histoire des sciences est un des beaux chapitres de l'histoire de l'esprit humain.

ÉMILE PICARD,

Secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences.



HISTOIRE DES SCIENCES EN FRANCE

PREMIÈRE PARTIE

HISTOIRE DES MATHÉMATIQUES DE LA MÉCANIQUE ET DE L'ASTRONOMIE

PAR

H. ANDOYER
DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES

ET

PIERRE HUMBERT
PROFESSEUR A L'UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER



CHAPITRE PREMIER

DES ORIGINES A DESCARTES

Les mathématiques dans l'antiquité. Pythéas. Rome et les Barbares. Caractères généraux des mathématiques au moyen âge. Les maîtres du treizième et du quatorzième siècle. La Renaissance. Le Collège de France. Viète.



ENTREPRENDRE de découvrir et de fixer la première origine des sciences parmi les Gaulois, ce serait vouloir deviner ce qui est inconnu et déterminer ce qui sera toujours incertain. » Ces mots restent actuels, par lesquels les Bénédictins de Saint-Maur ouvraient, au dix-huitième siècle, le premier volume de leur *Histoire littéraire de la France*. Tout au plus peut-on reconnaître dans notre pays les états successifs par lesquels passèrent, dans le monde occidental, les sciences mathématiques et astronomiques, florissantes avec les Grecs, stationnaires et délaissées chez les Romains, balayées par les Barbares, retrouvées pendant le moyen âge, soit par le travail personnel, soit par la recherche des textes anciens, soit par le contact avec l'Orient et les Arabes, jusqu'à leur constitution en doctrine originale et définitive avec le seizième et le dix-septième siècle.

LES CONNAISSANCES MATHÉMATIQUES
DE L'ANTIQUITÉ

Si l'on peut vraisemblablement chercher l'origine de l'arithmétique chez les commerçants phéniciens, de la géométrie chez les architectes égyptiens et

de l'astronomie chez les pasteurs chaldéens, c'est la Grèce qui, héritant de ces notions imprécises, leur a donné un développement rapide et prodigieux, aujourd'hui encore l'objet de notre admiration. Depuis Thalès de Milet, géomètre et astronome, qui prédit l'éclipse solaire de 585 avant notre ère, jusqu'à Diophante, sans doute le dernier savant grec original (350 après J.-C.), les découvertes vont se multiplier, principalement dans le domaine géométrique. C'est d'abord, à Crotone dans la Grande-Grèce, l'école pythagoricienne, hermétique et mystique, qui introduit diverses propositions fondamentales, comme la somme des angles d'un triangle, le théorème du carré de l'hypoténuse, la construction de certains polygones réguliers ; puis, au cinquième siècle, à Athènes, l'école platonicienne, pour qui la connaissance de la géométrie est nécessaire à l'intelligence de la philosophie : avec elle commencent les célèbres recherches qui occuperont la science pendant si longtemps, quadrature du cercle, trisection de l'angle, duplication du cube ou problème *délien* ; en même temps, sur les bords de la Propontide, Eudoxe et ses disciples fondent l'astronomie mathématique. Voici enfin l'apogée de la science grecque : d'une part à Syracuse, avec Archimède, l'étonnant génie auquel nous devons l'expression de la longueur de la circonférence, la quadrature de la parabole, les courbes spirales, d'importants résultats sur la sphère et le cylindre, les théorèmes sur les corps flottants ; d'autre part à Alexandrie, alors capitale intellectuelle du monde hellénique ; autour de sa célèbre bibliothèque va se développer une longue série de savants de premier ordre : Euclide, dont les *Éléments*, exclusivement enseignés pendant des siècles dans toutes les écoles de mathématiques, dominant encore la géométrie moderne ; Eratosthène, géographe, géodésien, chronologiste ; Apollonius de Perge avec son ouvrage important et très complet sur les coniques, envisagées comme sections planes quelconques de cônes circulaires quelconques ; l'astronome Hipparque, qui, à la suite de l'apparition d'une étoile temporaire, dresse le premier catalogue stellaire connu et généralise en Grèce, sous l'influence orientale, l'usage du système sexagésimal pour les calculs astronomiques et la division de la circonférence ; puis, plus tard, Ptolémée, qui construit des tables trigonométriques en s'appuyant sur la propriété du quadrilatère inscrit à laquelle son nom reste attaché, qui pose les principes de la géométrie sphérique, qui s'occupe avec succès de géodésie et de cartographie, enfin qui, dans sa *Syntaxe*, donne du mouvement des astres la célèbre explication adoptée pendant quatorze siècles, ne reculant pas devant l'introduction du système très compliqué des épicycles pour rendre compte des apparences tout en supposant la terre immobile au centre du monde, bien que trois cents ans auparavant Aristarque de Samos eût déjà édifié

l'hypothèse que devait retrouver Copernic ; Héron d'Alexandrie, insistant surtout, dans ses *Métriques*, sur les applications pratiques des mathématiques ; enfin, très tardivement, à l'époque où Diophante donne d'intéressants travaux arithmétiques qui annoncent l'algèbre, le compilateur Pappus publiant une *Collection mathématique* devenue pour nous d'une grande importance par ses éclaircissements, ses commentaires et les fragments qu'elle nous conserve de travaux antérieurs perdus. L'œuvre scientifique des Grecs fut donc, on le voit, surtout en géométrie et en astronomie, d'une richesse extraordinaire : et le monde antique était depuis bien longtemps en possession de résultats mathématiques étendus et fondamentaux, lorsque commencent à entrer dans le domaine historique les peuples de ce qui s'appellera la France.

P^{YTHÉAS} Quelque écho de la science hellénique parvint-il jusqu'en Gaule avec les fondateurs des villes grecques de notre côte méditerranéenne ? Ce qui est certain, c'est que Massilia et ses filles, Nicæa, Citharista, Antipolis, Agatha, villes maritimes de voyageurs et de commerçants, durent cultiver au moins une branche des mathématiques, l'astronomie nautique ; et, comme témoignage du développement que prit cette science sur nos rivages, un nom célèbre nous reste, celui de Pythéas. Né à Marseille, vivant vers l'an 325 avant notre ère, Pythéas, qui passe pour le plus ancien écrivain connu de l'Occident, est un astronome qui calcule, avec une remarquable précision, la latitude de sa ville natale, qui donne de l'obliquité de l'écliptique une mesure dont Laplace fera état, et qui n'ignore pas les particularités de l'action lunaire sur les marées ; c'est surtout un navigateur, qui ne recule pas devant les grandes expéditions, franchit les colonnes d'Hercule, atteint les côtes de Bretagne, pousse jusqu'aux régions scandinaves, découvre la lointaine île de Thulé et les bouches du Tanaïs brumeux, et rapporte de ses voyages une somme importante de documents, géographiques et astronomiques, sur les pays septentrionaux.

R^{OME ET LES BARBARES} Mais voici la conquête romaine, et l'adaptation de la Gaule à la civilisation latine. Comme on l'a vu dans l'*Histoire politique*, de tous côtés des écoles surgissent, qui dispensent la culture classique à de nombreux étudiants. Les écrivains nous ont conservé les noms de ces centres intellectuels, Autun, Lyon, Vienne, Arles, Bordeaux, Trèves ; et c'est avec éloges que Tacite parle des écoles de Marseille, où étudia Agricola. Comme à Rome, l'enseignement comprend grammaire, poésie, éloquence, droit, médecine, mathé-

matiques aussi : mais combien pâle et médiocre nous paraît cette science romaine, dédaigneuse des grands travaux de géométrie pure où s'était complu le génie hellénique, ne recherchant dans les mathématiques que le côté utilitaire et pratique, et réduisant Euclide aux proportions d'un traité d'arpentage ! Et si notre pays connut jamais la haute culture scientifique grecque, il l'avait bien oubliée lorsque le torrent des invasions vint effacer momentanément jusqu'au pâle reflet qu'en avait conservé le monde latin

CARACTÈRES GÉNÉRAUX DES MATHÉMATIQUES AU MOYEN ÂGE Sous la ruée barbare, une seule force reste debout : l'Église. C'est elle qui gardera les restes de la civilisation gréco-latine, qu'elle finira par imposer aux nouveaux conquérants. « L'Église, dit Taine, sauve ce qu'on peut encore sauver de la culture classique. Par ses écoles et ses couvents, elle conserve les anciennes acquisitions du génie humain, la langue latine, la littérature et la théologie chrétiennes, une portion de la littérature et des sciences païennes,... surtout l'habitude et le goût du travail. » C'est donc seulement dans les écoles établies, suivant les prescriptions de la règle de saint Benoît, dans l'intérieur des cloîtres, puis à l'ombre des cathédrales, que nous pourrions retrouver quelques traces de l'enseignement et de la recherche ; c'est dans ces écoles, plus tard transformées en universités, que nous verrons se réaliser l'assimilation par le monde nouveau de la science ancienne peu à peu rétablie, ce que Duhem a appelé l'initiation des barbares. On comprendra dès lors que les mathématiques soient restées, pendant tout le moyen âge, à peu près uniquement une matière d'enseignement, et que les travaux auxquels elles ont donné lieu ne soient guère que des compilations à but didactique ou des traductions d'ouvrages antérieurs : quelques noms à peine émergeront d'auteurs originaux ; et l'on ne sera pas surpris d'autre part de voir cette science cultivée par des hommes presque tous d'Église, théologiens et dialecticiens tout autant que physiciens ou mathématiciens.

PÉRIODE ANTÉRIEURE AU DIXIÈME SIÈCLE C'est précisément dans ces compilations, à caractère général et encyclopédique, que nous nous mettrons au courant des connaissances scientifiques du moyen âge et des matières étudiées dans ses écoles. L'une des plus anciennes et des plus célèbres, le principal, sinon l'unique manuel d'enseignement pendant plusieurs siècles, est l'ouvrage rédigé par saint Isidore de Séville (570-636), évêque et docteur de l'Église, sous le titre d'*Origines* ou *Étymologies*. Ce n'est rien de plus qu'un recueil de définitions, tout à fait élémentaires, portant sur les diverses branches des sciences. A côté de ce

livre, on trouve encore dans les écoles quelques fragments d'auteurs latins du cinquième siècle, comme Macrobe, dont le médiocre commentaire du *Songe de Scipion* de Cicéron jouira d'une faveur extraordinaire, comme Cassiodore, comme Martianus Capella, surtout comme Boèce. Immense fut l'influence de ce dernier écrivain : c'est en effet dans ses ouvrages que se rencontrent pour la première fois les termes, répétés ensuite par le moyen âge tout entier, de *trivium* et de *quadrivium*, pour désigner les deux groupes des sept arts libéraux, grammaire, rhétorique, dialectique, d'une part, arithmétique, géométrie, musique, astronomie, d'autre part : division d'ailleurs très ancienne, que l'on trouve déjà, au premier siècle avant notre ère, dans Varron, et qui remonte sans doute à l'école pythagoricienne, où l'on étudiait les nombres absolus avec l'arithmétique, appliqués avec la musique, les grandeurs en repos avec la géométrie, en mouvement avec l'astronomie. Elle dominera pendant près de dix siècles ; et les sculpteurs de Chartres ne l'oublieront pas, quand, au portail vieux, ils figureront les sept arts libéraux, les accompagnant de l'image d'un savant : pour l'arithmétique, Boèce, la géométrie, Euclide, l'astronomie, Ptolémée, et la musique, Pythagore. A chacune de ces branches du quadrivium, les quatre portes de la science, suivant l'expression de Cassiodore, Boèce consacre un traité : son arithmétique est un exposé des propriétés les plus simples des nombres et des proportions, le tout considéré d'ailleurs d'un point de vue quelque peu mystique ; sa géométrie, une suite d'énoncés empruntés à Euclide, avec des règles, souvent fausses, pour l'évaluation des aires planes ; sa musique, une étude presque purement numérique des intervalles et des modes ; son astronomie, aujourd'hui perdue, était sans doute une traduction de Ptolémée. Et tel était, à n'en pas douter, l'ensemble des connaissances scientifiques de cette époque. Bien peu de chose d'ailleurs nous reste de ces manuscrits des premiers siècles : il devait exister aussi de nombreuses traditions orales, des règles élémentaires pour le calcul numérique, — on comptait évidemment sur ses doigts, et peut-être, dans certaines écoles, faisait-on usage de l'abaque, — pour le calcul des fractions duodécimales suivant l'usage des Romains, pour le comput ecclésiastique et la fixation de la fête de Pâques : mais sur ces points les renseignements précis nous manquent, et nous sommes réduits aux conjectures.

ALCUIN ET L'ÉCOLE DE TOURS Sur les savants qui, en France, pour cette période antérieure au dixième siècle, cultivèrent les sciences du quadrivium, c'est encore la même obscurité ; il nous est cependant permis de revendiquer un grand nom, celui d'Alcuin. On sait comment ce maître célèbre de l'école d'York, sa ville natale, disciple d'Egbert et continuateur de Bède le Vénérable,

fut rencontré à Parme par Charlemagne qui se l'attacha ; et on sait également combien prépondérant fut son rôle dans la divulgation des méthodes de l'enseignement. Esprit encyclopédique, possédant parfaitement toute la science de son temps, surtout pédagogue merveilleux, c'est à lui que l'on peut vraisemblablement attribuer le recueil des propositions *ad acuendos juvenes*, collection de problèmes « plaisants et délectables » d'origine romaine, et dont la solution demande souvent plus d'ingéniosité que de science. Quel qu'en soit l'auteur, ils correspondent bien, en tout cas, à ce qu'on connaît des méthodes d'enseignement d'Alcuin, de la bonne humeur avec laquelle il interrogeait les élèves et leur répondait, de la manière claire, facile à retenir, dont il expliquait les difficultés.

C'est à Alcuin que l'on doit la fondation de l'insigne école du monastère de Saint-Martin, à Tours, dont il fut abbé depuis 796 jusqu'à sa mort en 804, et qui, sous son impulsion, devint un véritable foyer de lumières, d'un rayonnement intense et étendu. Dans cette école, trois jeunes moines de Fulda étaient envoyés par leur abbé, Ratgar, pour suivre les leçons d'Alcuin : l'un d'eux était Rhaban Maur, qui mérita plus tard le nom de *primus præceptor Germaniæ*.

Pour brillante qu'elle fût, cette école de Saint-Martin était loin d'être la seule dans l'empire de Charlemagne : Orléans, sous Théodulphe, Lyon, sous Leidrade, Aniane, sous le second saint Benoît, comptent parmi les plus célèbres de ces écoles carolingiennes qui, réglementées par le concile d'Aix-la-Chapelle en 817, préludèrent aux grandes écoles des dixième, onzième et douzième siècles, et par là aux universités du treizième.

UN MATHÉMATICIEN FRANÇAIS SUR LE TRÔNE DE SAINT PIERRE

Bien au-dessus des quelques auteurs qui, au dixième siècle, cultivent les mathématiques ou l'astronomie et consacrent à ces sciences des traités toujours peu originaux, comme saint Abbon de Fleury sur le cours des planètes ou Hériger de Laubes sur le comput, la figure prépondérante à cette époque est celle de Gerbert. Né en Auvergne, vers le milieu du dixième siècle, élevé au monastère d'Aurillac où l'on conservait le souvenir de saint Odon de Cluny qui le dirigea, ce moine bénédictin devint pape en 899 et prit le nom de Sylvestre II. Nous n'avons pas à parler ici du rôle religieux et politique du premier pontife français : son rôle scientifique est considérable. Très instruit, ayant recueilli dans l'école épiscopale d'Ausona, dans la marche d'Espagne, où il étudia, quelques lointains échos de la science arabe, ayant trouvé dans l'abbaye de Bobbio, qu'il gouverna, des richesses scientifiques peu connues, telles que les œuvres complètes de Boèce et la collection des *agrimensores*

romains, il s'occupa passionnément de sciences, même une fois à Rome ; ses traités sur l'abaque, sur la géométrie, surtout son livre de l'astrolabe, furent lus et expliqués pendant plusieurs siècles ; l'enseignement qu'il donna pendant quinze ans à l'école de Reims fut incomparable par son éclat : le moine Richer, son disciple, nous a conservé le souvenir de la peine qu'il prenait pour expliquer les sciences, des appareils de démonstration qu'il avait inventés, sphère solide où étaient figurées des constellations, pour l'astronomie, monocorde, pour la musique, abaqes, pour les opérations de l'arithmétique et de la géométrie pratique ; et par-dessus tout de l'influence qu'il exerçait sur ses élèves. Par lui a été formée la génération des abacistes, Bernelin, Raoul de Laon, Gerland de Besançon, qui commencent à se servir, à côté des chiffres romains, de nouveaux signes assez semblables à ceux que le monde emploie depuis la fin du quatorzième siècle, et qui posséderaient déjà complètement la numération décimale, si le zéro ne leur était inconnu.

L'ÉCOLE DE CHARTRES Si le dixième siècle est celui de Reims, le onzième est celui de Chartres. Poitiers, Laon, le Bec ont des écoles célèbres : mais le véritable centre scientifique semble être l'école épiscopale de Chartres. Une bibliothèque assez riche, une méthode d'enseignement où la plus grande place est faite aux règles mnémoniques en vers, des maîtres réputés comme saint Fulbert, puis Thierry, au commencement du douzième siècle, ont amené à Chartres, de toutes les villes de France et des pays rhénans, des élèves nombreux : tel Francon de Liège, qui écrit un traité sur la quadrature du cercle ; tel Rodolphe de Liège, qui entretient avec son ancien condisciple Ragimbald, devenu grand école de Cologne, une active correspondance mathématique où les sujets traités, somme des angles d'un triangle, duplication du cube, nous font quelque peu sourire ; tel aussi ce Gilbert Maminot, évêque de Lisieux, qui passe ses nuits à faire des observations astronomiques et inflige des leçons d'arithmétique aux chanoines de sa cathédrale.

LES ACQUISITIONS NOUVELLES DU DOUZIÈME SIÈCLE Les croisades dominent le douzième siècle ; et leurs conséquences, considérables au point de vue religieux, politique, artistique, ne le sont pas moins au point de vue scientifique. Les rapports s'établissent avec l'empire grec, et l'Orient révèle à l'Occident des fragments d'Aristote, des œuvres d'Euclide, de Ptolémée, jusqu'alors inconnues ; tandis que les croisés français ramènent de leur passage ou de leur séjour en Italie une arithmétique nouvelle, perfectionnée par les commerçants italiens,

avec le système moderne de numération enfin complété par le zéro. Et voici qu'en même temps la France commence à découvrir l'œuvre très riche des mathématiciens et astronomes arabes, héritiers des Hindous et des Grecs ; des équipes de traducteurs, les Adélarde, les Robert de Rétines, pour la plupart anciens élèves des écoles chartraines, fouillent les bibliothèques musulmanes d'Espagne ; l'œuvre, ainsi introduite, de Mohammed ben Moses al Chwarizm fera donner, jusqu'à la fin du moyen âge, à l'arithmétique le nom d'*algorismus*, cependant que Gérard de Crémone fait entrevoir l'algèbre, réduite encore aux équations des deux premiers degrés, et, par sa traduction (1175) de l'*Almageste*, ou adaptation arabe de la grande Syntaxe de Ptolémée, met son époque au courant de l'essentiel de l'astronomie antique. Pas de travaux originaux, pendant ce douzième siècle tout entier occupé à méditer ses acquisitions nouvelles et à les transmettre aux jeunes générations qui sauront les développer. Et précisément, sur les bords de la Seine, autour de Sainte-Geneviève ou du cloître Notre-Dame, un foyer d'études et d'enseignement commence à s'organiser et attire des foules de plus en plus nombreuses ; et si le plus fameux maître de ces écoles, Abélard, peu versé dans les sciences, devait en demander secrètement des leçons à Thierry de Chartres, du moins un étudiant anglais nous dit-il d'un autre professeur de Paris, Richard de Coutances : « J'ai appris avec lui différentes choses du quadrivium que j'ignorais, l'ayant fort peu étudié sous l'Allemand Hardewin. »

LE TREIZIÈME SIÈCLE Il semble dès lors qu'on puisse distinguer trois courants scientifiques dans le siècle qui suit : les écoles méditerranéennes continuent à rechercher, à traduire et à adapter les œuvres gréco-arabes ; les centres nouveaux que sont les universités, celle de Paris surtout, font rayonner sur la France et les pays voisins leur enseignement solidement réglementé ; enfin et pour la première fois peut-être, le monde occidental ne se contente plus d'assimiler : il crée des œuvres originales.

LES ÉCOLES MÉRIDIONALES C'est par Marseille et Montpellier que l'astronomie arabe continue à pénétrer en France. Déjà, en 1140, un anonyme marseillais avait transposé, pour le méridien de Marseille, les tables d'Arzachel (dites tables de Tolède) pour le calcul des lieux des planètes : dans la même ville, Guillaume l'Anglais, médecin et astronome, publie en 1230 un livre destiné à faire connaître les instruments arabes ; maître Robert Anglicus, professeur à Montpellier en 1271, après avoir rédigé, à l'usage de ses étudiants, une sorte de manuel d'astro-

nomie et aussi d'astrologie, donne en 1275 un *Traité du quadrant*, adaptation d'ouvrages arabes, qui eut un grand succès et fut traduit par la suite en allemand, en hébreu, en grec ; les rabbins de la célèbre école de Lunel, Samuel Ibn Tibbon, Jacob d'Antoli, Moïse ben Samuel, traduisent d'arabe en hébreu, puis d'hébreu en langue vulgaire, de nombreux et importants ouvrages, commentaires d'Ibn al Haïtam sur Euclide, théorie des planètes d'Albitrogi, abrégé d'astronomie attribué à Ptolémée ; tandis que Jacob ben Makir, connu sous le nom de Profatius Judæus, né à Marseille vers 1236 et vivant à Montpellier, s'occupe spécialement des instruments astronomiques, traduit divers traités arabes sur ce sujet, rédige un ouvrage original sur le quadrant *secundum modernos*, et établit pour le méridien de Montpellier des tables planétaires calquées sur celles de Tolède.

L'UNIVERSITÉ DE PARIS Née vers 1220 de la fusion des écoles de Notre-Dame, de Saint-Victor et de Sainte-Geneviève, l'Université de Paris se classe bientôt au premier rang dans tous les ordres d'études : son organisation en quatre facultés, théologie, droit, médecine, arts (cette dernière comprenant l'ensemble du trivium et du quadrivium), ses groupements régionaux en quatre nations, français, normands, picards, anglais, ses collèges, hôtelleries d'abord pour étudiants pauvres, puis établissements d'enseignement intérieur — Navarre, Harcourt, et celui que fonda sous saint Louis le confesseur du roi, Robert de Sorbon — en font un modèle que les autres centres cherchent à imiter ; son rayonnement s'étend fort loin, et l'on peut dire qu'il n'est guère au treizième siècle de savant qui n'y ait été élève ou maître, sinon les deux. Parmi les étrangers, Robert Grosse-Tête, Thierry de Saxe, Bacon, l'auteur d'un commentaire astronomique et physique d'Aristote, Jean de Sacrobosco (Halifax) dont le traité *De sphaera mundi*, simple extrait de l'*Almageste*, fut utilisé et commenté dans les universités pendant trois siècles, saint Thomas d'Aquin et saint Bonaventure, chez qui l'astronomie côtoie souvent la théologie ; parmi les Français, le franciscain Bernard de Verdun, le dominicain nîmois Bernard de Trilles, tous deux auteurs de traités sur les mouvements célestes ; tels sont les plus grands noms attirés par l'éclat des écoles parisiennes. Vers la fin du siècle apparaissent, d'un auteur inconnu, un traité de géométrie et un traité d'algorisme, conservant quelques traces du système de numération vigésimal, et, d'un anonyme se disant astrologue de l'empereur Baudouin de Courtenay, un *Introductoire d'astronomie*, — trois ouvrages très médiocres, mais les premiers de ce genre écrits en français. D'ailleurs les vastes compilations continuent, comme le *Speculum majus* de Vincent de Beauvais, qui expose l'ensemble des connaissances

de son temps, comme le *De proprietatibus rerum* de Barthélemy l'Anglais, véritable ouvrage de vulgarisation encyclopédique, très en retard sur son siècle, et dont le succès fut cependant tel que traduit en français sur l'ordre de Charles V en 1372, sous le titre de *Propriétaire des choses*, en provençal pour Gaston Phébus, en anglais, en italien, on l'imprime encore en 1601 !

**L E CALENDRIER POUR LA
REINE DE FRANCE**

Mais, nous l'avons dit, il y a aussi en ce treizième siècle de véritables savants, qui font autre chose que copier ou commenter, et qui savent inventer. Peut-être doit-on compter parmi eux l'astronome parisien Guillaume de Saint-Cloud, qui, par ses observations personnelles, découvre et corrige des erreurs dans les tables déjà existantes, et qui, préoccupé par le grand nombre d'ophtalmies dont étaient atteints les gens qui avaient sans précautions regardé une éclipse de soleil, indique pour l'avenir le procédé de la chambre noire. Le calendrier qu'il établit pour la reine Marie de France, femme de Philippe le Hardi, et qui donne les hauteurs du soleil, la durée des jours et des nuits, les éléments du comput, montre que ce que nous appellerions aujourd'hui le grand public prenait déjà intérêt aux choses de science.

**J ORDANUS
NEMORARIUS**

Parmi les mathématiciens originaux, grandes figures de ce siècle, à côté de Léonard Fibonacci de Pise, vient se placer un personnage assez énigmatique, Jordanus Nemorarius, que les uns disent italien, d'autres rhénan, et qu'on s'accorde généralement à identifier avec le bienheureux Jourdain de Saxe, premier supérieur général des dominicains, qui prit l'habit et enseigna à Paris vers 1220. Ses ouvrages, très nombreux, très lus dans la suite, très souvent réédités dès la découverte de l'imprimerie, ont une marque de personnalité tout à fait saisissante. Son introduction systématique des lettres pour représenter les inconnues fait pressentir l'algèbre, malgré les imperfections de son procédé et l'absence des signes d'égalité et d'opération ; sa solution de la trisection de l'angle inaugure l'usage du mouvement en géométrie ; son traitement du problème du levier est fondé pour la première fois sur le principe du travail virtuel. Ses œuvres se sont répandues bien vite dans toutes les universités de l'Occident ; leur influence a été grande sur l'école des algébristes italiens de la Renaissance.

**L ES MAÎTRES DU QUA-
TORZIÈME SIÈCLE**

Pendant le quatorzième siècle, en tout comparable au précédent, c'est encore Paris qui reste la capitale intellectuelle, et ses maîtres demeurent les premiers du monde savant.

Toutes les branches des mathématiques continuent à y être étudiées, la mécanique par Albert de Saxe et Thimon le Juif, qui écrivent sur les centres de gravité, la géométrie par Dominique de Paris, qui possède des idées justes sur la quadrature du cercle, la trigonométrie par Jean de Linières, dont on conserve une table de sinus, l'astronomie par Firmin de Belleval, auteur d'un traité bientôt classique ; sans parler d'un autre maître célèbre de Paris, personnage devenu à plusieurs points de vue presque légendaire, Jean Buridan, sur la valeur mathématique duquel on est assez mal renseigné. D'autre part, des préoccupations nouvelles se font jour : les erreurs du calendrier julien suscitent des projets de réforme ; supprimer toutes les années bissextiles pendant quarante ans, c'est ce que propose le Normand Jean de Meurs ; en supprimer une tous les cent trente ans, c'est l'idée soumise au concile de Constance par Pierre d'Ailly, né à Compiègne en 1350, recteur de l'Université de Paris, évêque de Cambrai, cardinal-légat pour l'Allemagne, auteur d'un ouvrage de géographie, *De Imagine mundi*, lu et longuement médité par Christophe Colomb.

Mais le grand nom est celui de Nicole Oresme, que certaines parties de son œuvre peuvent faire à bon droit considérer comme un précurseur. Né vers 1323, sans doute aux environs de Caen, il fut successivement élève, professeur, puis grand maître au collège de Navarre, qu'il quitta pour Rouen en 1361. Ami et conseiller de Charles V, pour qui il traduisit en français des ouvrages d'Aristote, il fut fait en 1377 évêque de Lisieux, et mourut probablement cinq ans après. C'est à lui que nous devons toutes nos expressions actuelles d'astronomie et de géographie, extraites du *Traité de la sphère* qu'il écrivit en français, évidemment après 1361, car au collège de Navarre le latin était seul admis. Dans son *Algorismus proportionum*, qui ne fut imprimé qu'au début du seizième siècle, il emploie pour la première fois les exposants fractionnaires dans le calcul des radicaux ; mais c'est surtout dans le *Tractatus de latitudine formarum* et le *Tractatus de uniformitate et difformitate intensionum* qu'il se montre vraiment précurseur de Descartes et de la géométrie analytique, en représentant graphiquement la variation d'un phénomène par des coordonnées qu'il appelle longitude et latitude, de Fermat et du calcul infinitésimal en étudiant la variation de la latitude dans un demi-cercle, et remarquant que la vitesse en est minimum au point le plus haut. Mais les idées nouvelles qu'Oresme introduisit ainsi, et qui le mettent bien au-dessus de ses prédécesseurs, disparurent avec lui.

L ES ANNÉES DE D'ailleurs le quinzième siècle est une époque de décadence scientifique très nette, dans cette France bouleversée par la guerre de Cent ans. D'autre part, l'Université de Paris, s'étant déclarée

pour le pape d'Avignon, est abandonnée de tous ceux qui tiennent pour Rome et perd sa suprématie intellectuelle. Évitant les écoles anglaises, éprouvées elles aussi par la guerre de Cent ans, puis par celle des Deux-Roses, c'est maintenant vers les villes allemandes que se dirigent les étudiants. Mais que sont ces universités nouvelles, qui, comme Prague ou Vienne, datent de la seconde moitié du quatorzième siècle, sinon les filles de Paris ? Leurs fondateurs, les Albert de Saxe, les Henri de Hesse, étaient tous d'anciens élèves des maîtres parisiens ; c'est à Paris qu'ils ont puisé ou perfectionné leur science ; et c'est sur le modèle de l'Université de Paris, avec sa division en facultés et en nations, qu'ils organisèrent les universités d'outre-Rhin.

NICOLAS CHUQUET Au milieu de cette décadence générale, surnage, cependant, un nom de savant original et supérieur : et de même que le treizième siècle a produit Jordanus et le quatorzième Oresme, le quinzième nous offre Nicolas Chuquet, médecin de Lyon et ancien étudiant parisien. Le livre qu'il écrivit en français, vers 1484, et qui ne fut imprimé que de nos jours, — il n'aurait pas été compris à son époque, — le *Triparty en la science des nombres*, contient des idées extrêmement remarquables. Dans ce traité d'arithmétique, sans doute inspiré de travaux similaires italiens dont le commerce avait suscité le développement, il se montre à la fois très supérieur à son temps et très près de nos jours. Comparaison entre deux progressions, géométrie et arithmétique, et loi de correspondance entre leurs termes, ce qui contient en germe tout le calcul logarithmique ; introduction d'exposants négatifs et nuls ; étude très générale des équations trinômes qui se réduisent au second degré ; intuition de règles analogues à créer pour des équations plus compliquées ; essai d'interprétation des solutions négatives ; toutes ces idées appartiennent en propre à Chuquet ; en grand progrès sur les savants du moyen âge, encore hésitants et peu originaux, il annonce le mathématicien de génie qui surgit au seizième siècle, François Viète.

LA RENAISSANCE Ce n'était donc pas sans raison qu'un certain Grec nommé Hermonyme, rencontrant quelque part Lefèvre d'Étaples, au début du seizième siècle, lui faisait un grand éloge de l'Université de Paris, ajoutant toutefois qu'une chose y manquait : les mathématiques. L'époque qui s'ouvrait allait heureusement marquer quelque changement ; si, jusque vers son milieu, ce seizième siècle n'a guère produit en France que des traducteurs et des commentateurs, jetés dans l'étude de la science antique par le mouvement général

de la Renaissance, du moins a-t-il inauguré, avec la création du Collège royal, l'enseignement des mathématiques pures enfin dégagées du moule étroit du quadrivium, et a-t-il vu le début, avec Viète, d'une période scientifique extrêmement glorieuse pour la France.

ÉDITEURS, TRADUCTEURS, COMMENTATEURS Est-ce précisément pour remédier à la faiblesse que lui avait signalée Hermonyme, que Jacques Lefèvre d'Étaples, ce Faber Stapulensis que l'*Histoire des Lettres* nous a appris à connaître, fait imprimer un certain nombre d'écrits de mathématiciens antiques ou médiévaux, arithmétique de Jordanus, sphère de Sacrobosco, traduction d'Euclide ? En tout cas, ces éditions, toutes antérieures à 1516, sont suivies d'une ruée générale vers les œuvres des auteurs grecs ; on met au jour des fragments encore inconnus, on restitue les textes, on entreprend des traductions latines ou françaises, on ajoute souvent des réflexions ou des commentaires, on discute certains points qui semblent obscurs, comme la question de l'angle de contingence d'Euclide, angle d'un cercle avec sa tangente, qui paraît passionner au plus haut degré les savants de cette époque. Parmi ces éditeurs, presque tous d'ailleurs sans grande originalité, on peut citer Pierre Mondoré, bibliothécaire de la Bibliothèque royale de Paris, qui donne le dixième livre d'Euclide, Jean de la Pène, originaire d'Aix, qui traduit en latin les sphériques de Théodose et les écrits d'Euclide sur l'optique et la musique, Pasquier Duhamel qui commente l'*Arénaire* d'Archimède, Pierre Forcadel, de Béziers, qui met en français des œuvres de Jordanus et les éléments d'Euclide, tandis que Jacques Peletier, du Mans, et François de Foix-Candale, évêque d'Aire, entreprennent l'un et l'autre une édition annotée de ce même Euclide. Même manque d'originalité aussi chez les rares auteurs d'ouvrages nouveaux, comme Charles de Bouelles, chanoine de Noyon, qui donne deux géométries, l'une latine (1503), l'autre française (1542) ; c'est à peine si l'intérêt grandit un peu avec Butéon, pseudonyme de Jean Borrel (1492-1572), général de l'ordre des antonins, qui résout la duplication du cube par une méthode d'approximation indéfinie, comme jadis Archimède pour la longueur de la circonférence, et qui fait les premiers pas dans la voie de l'élimination des inconnues entre plusieurs équations linéaires. Il faut citer cependant, malgré leur valeur médiocre, les deux ouvrages qui inaugurent en France les mathématiques financières : le *Traité d'arithmétique*, presque uniquement commerciale, d'Estienne de la Roche dit Villefranche (1520) ; et le *Petit discours des changes, avec l'art de calculer aux jetons*, de Jean Trenchant (1566), auteur aussi de tables d'intérêt. On avait en effet l'habitude, à cette époque, de compter à l'aide de jetons, suivant

le même principe de numération que le système romain ; procédé ancien — on connaît un jeton ayant appartenu à Blanche de Castille — et qui durera fort longtemps : c'est ainsi que, dans *le Malade imaginaire*, Argan calcule les parties de son apothicaire ; les devises que portent ces jetons doivent, d'après le règlement de 1701, être fixées au début de chaque année par l'Académie des inscriptions.

L A PREMIÈRE MESURE GÉODÉSIQUE C'est dans cette première moitié du seizième siècle, si pauvre en France au point de vue des mathématiques — alors que ces sciences étaient développées avec grand succès, en Allemagne par Michel Stifel, en Italie par Tartaglia et Jérôme Cardan — que se place un fait, d'ordre astronomique, assez intéressant : une tentative de mesure des dimensions terrestres. L'antiquité nous avait légué sur ce point les célèbres travaux d'Eratosthènes (250 avant J.-C.), puis de Ptolémée ; la science arabe, en 827, en avait tenté une vérification sur l'ordre du khalife Al Mamoun ; puis on s'était complètement désintéressé de ces questions pendant sept siècles, et le premier essai géodésique moderne ne date que de 1528. C'est un Français, Jean Fernel (1497-1558), médecin de grande valeur, originaire de Clermont-en-Beauvaisis, qui en eut l'idée et la réalisa, en mesurant l'arc de méridien Paris-Amiens. Déterminant les latitudes des extrémités par des hauteurs solaires, et la distance par un simple compteur de tours adapté à la roue de sa voiture, il trouva pour l'arc de un degré la longueur de 57 070 toises, ce qui correspond pour le quart du méridien à 10 011 kilomètres, résultat dont il faut peut-être, vu la grossièreté du procédé, attribuer au hasard la quasi-exactitude.

L E COLLÈGE DE FRANCE. FINE ET RAMUS Et cependant, si la France ne produisait que des mathématiciens de second plan, les mathématiques y étaient en honneur. On commençait à entrevoir en elles une science distincte, ayant ses disciplines propres, et méritant d'être étudiée pour elle-même ; aux trois chaires de grec, de latin et d'hébreu qu'avait fondées François I^{er} en 1530, sous l'inspiration de Budé, pour établir un enseignement supérieur en dehors de l'Université, et dont la réunion forma le Collège royal, — depuis Collège de France, — vint s'adjoindre presque immédiatement une chaire de mathématiques, suivie d'une seconde en 1540. Ne voyons dans le premier titulaire, le Briançonnais Oronce Finée ou mieux Fine (1494-1555), que le restaurateur des études mathématiques en France, le professeur très renommé qui possédait parfaitement l'art d'intéresser son auditoire, et dont les leçons attiraient une foule sans exemple ; rendons hommage



UN COURS D'ALCUIN A L'ABBAYE DE SAINT MARTIN A TOURS EN 800.

à son talent de cartographe comme à son habileté de mécanicien ; oublions le mathématicien dont les ouvrages sont bourrés d'erreurs énormes, déjà relevées par ses contemporains, comme ses solutions, avec la règle et le compas, de la quadrature du cercle ou de la trisection de l'angle. Étranges d'ailleurs étaient ces premiers « lecteurs royaux » en mathématiques : Pierre la Ramée, dit Ramus, né près de Noyon en 1515, lecteur de 1551 à 1572, eut toutes les peines du monde à comprendre Euclide ; ce fut cependant un excellent professeur, qui publia divers ouvrages d'enseignement fort estimés, et dont l'influence fut grande sur la génération qu'il instruisit. Après avoir fait ses études à Paris comme domestique d'un étudiant riche, il soutint, à vingt et un ans, une thèse pour le titre de maître ès arts : *Que tout ce qu'a dit Aristote n'est que fausseté*. Et, durant toute sa vie, il cultiva ainsi l'exagération et le paradoxe, admirant à l'excès les mathématiciens allemands, ignorant l'effort scientifique du moyen âge, déclarant préférer aux démonstrations géométriques des entretiens sur le calcul avec les marchands de la rue Saint-Denis.



ORONCE FINE

(D'après une gravure anonyme).

Les ennemis, naturellement, ne lui manquèrent pas ; le plus acharné fut Charpentier, encore un autre de ces étonnants lecteurs en mathématiques du Collège royal, qui disait que ces sciences étaient « une fange où seul un porc pouvait se complaire », et qui aurait poussé la haine contre Ramus jusqu'à le faire assassiner à la Saint-Barthélemy. Le nom de Ramus survécut d'ailleurs, au Collège, par la chaire qu'il y fonda, et qui devait revenir tous les trois ans au concours : exemple suivi à Bordeaux — témoignage du renouveau en France des études scientifiques — par l'archevêque de Foix-Candale : là le titulaire était tenu d'avoir fait quelque découverte nouvelle dans des domaines déterminés. Cette chaire existait encore au dix-huitième siècle ; quant à celles du Collège de France, l'une d'elles disparut en 1792 ; les deux autres subsistent, consacrées à des enseignements élevés, en dehors de tout programme officiel ; la liste de leurs titulaires jusqu'à nos jours est celle des premiers mathématiciens français.



PIERRE RAMUS
(D'après une gravure de Sichem).

VIE. Lors donc que le savant hollandais Adrien Romanus lançait, en 1593, suivant l'usage du temps, un défi aux mathématiciens du monde entier en leur proposant la résolution d'une certaine équation du quarante-cinquième degré, il ne pensait sans doute guère que la réponse pût venir de France ; et ce fut pourtant un Français qui, voyant l'énoncé du problème, s'écria : *Ut legi, ut solvi : nec me malus abstulit error*, et même, en plus de la solution que demandait Romanus, en fit connaître vingt-deux autres auxquelles le Hollandais n'avait pas songé.

Il se nommait François Viète, et se disait seigneur de la Bigotière ; son aïeul était marchand, et son père procureur à Fontenay-le-Comte, capitale du Bas-Poitou. C'est là qu'il était né en 1540, là qu'il fit ses études chez les Cordeliers, comme auparavant Rabelais, et apprit assez de grec pour pouvoir lire dans le texte Euclide et Apollonius. Après être allé étudier le droit à Poitiers, il revint s'établir à Fontenay, et la liste de ses clients, où figurent les noms de Marie Stuart et d'Éléonore d'Autriche, nous le montre alors comme l'un des meilleurs avocats du Poitou. C'est sans doute cette renommée qui décida le sieur de Soubise à se l'attacher comme secrétaire, fermant les yeux, huguenot notoire, sur le papisme d'ailleurs extrêmement modéré de Viète, et lui confiant l'éducation classique et scientifique de sa fille, Catherine de Parthenay-l'Archevêque. Après le mariage de son élève, Viète fut en 1571 avocat au Parlement de Paris, en 1573 conseiller au Parlement de Bretagne, enfin, par la faveur d'Henri III, maître des requêtes de l'Hôtel royal, et, par celle d'Henri IV, conseiller du roi en ses conseils. « Il y a longtemps qu'il me fait service, et en ai tout contentement », écrit Henri IV. Viète avait montré d'ailleurs, en 1589, en même temps que son habileté, son zèle pour l'État : dans les dépêches chiffrées qu'ils envoyaient à leurs agents secrets, les Espagnols, pour nous dérouter, venaient d'introduire cinq cents caractères nouveaux, et les traducteurs officiels renonçaient à comprendre : en quinze jours, Viète découvrit le secret du chiffre. Estimé et admiré de tous, gratifié d'une pension royale, il mourut à l'âge de soixante-trois ans.

SON ŒUVRE Avocat, magistrat, rien d'un savant de profession, il
MATHÉMATIQUE fut le plus grand mathématicien de son siècle. Cette science qu'il cultiva pour son plaisir, depuis l'époque où il était aux ordres de Soubise jusqu'à sa mort, il la comprit et la maîtrisa plus que nul autre autour de lui, et y apporta certaines idées nouvelles sur lesquelles nous vivons encore aujourd'hui. Il étudia les mathématiques avec passion, restant parfois, dit son ami de Thou, « trois jours de suite sans quitter son travail et même sa table où on lui apportait de quoi réparer les forces qu'il dissipait par une application si continuelle ». Il produisit beaucoup, faisant imprimer à ses frais, surtout dans les dernières années de sa vie, de nombreux travaux qu'il envoyait à ses confrères ; et si l'ouvrage que Schooten publia, au dix-septième siècle, sous le titre : *Francisci Vietæ opera mathematica*, ne représente certainement qu'une partie de son œuvre immense, les traités ainsi réunis, malgré leur langue sans doute volontairement obscure, leur latin hérissé d'expressions grecques, plus même que ne l'exigeait la mode du temps, nous suf-

fisent pour apprécier la valeur de Viète et son rôle prépondérant non pas, comme on a l'habitude de le croire, en algèbre seule, mais aussi en géométrie et en trigonométrie.

EN ALGÈBRE On répète que Viète est le fondateur de l'algèbre moderne ; et l'on a raison. Dans son *Introduction (Isagoge) à l'art analytique*, dont l'épigraphe est : *Nullum non solvere problema*, il distingue, reprenant un terme usité par les Grecs, entre la *logistique nombreuse*, ou calcul numérique, et la *logistique spécieuse*, calcul sur des signes (*species*) ou des figures, les lettres de l'alphabet par exemple : c'est donc très exactement notre calcul littéral, notre algèbre ; et si, avant lui, quelques-uns avaient songé à représenter les inconnues par des symboles, il est le premier à étendre cette idée aux quantités supposées connues : voyelles pour les inconnues, consonnes pour les données. Ainsi se trouve créée la notion fondamentale de formule, qui permet de résoudre une fois pour toutes les problèmes d'un même type, sans qu'il soit nécessaire de reprendre la chaîne des raisonnements et des résultats intermédiaires, et dont l'importance n'a pas besoin d'être signalée. Très habile d'ailleurs dans le calcul arithmétique pratique, donnant des règles pour l'extraction des racines, des procédés de résolution des équations par approximations successives, Viète est en possession de presque tous nos éléments actuels de calcul algébrique ; il sait traiter les équations d'une façon générale, les rendre rationnelles, les transformer, changer d'inconnue au besoin ; il connaît les relations entre les coefficients et les racines, lorsque celles-ci sont toutes positives ; car, et c'est la seule chose qui lui manque, il ne sait pas reconnaître les racines négatives et n'en admet pas l'existence.

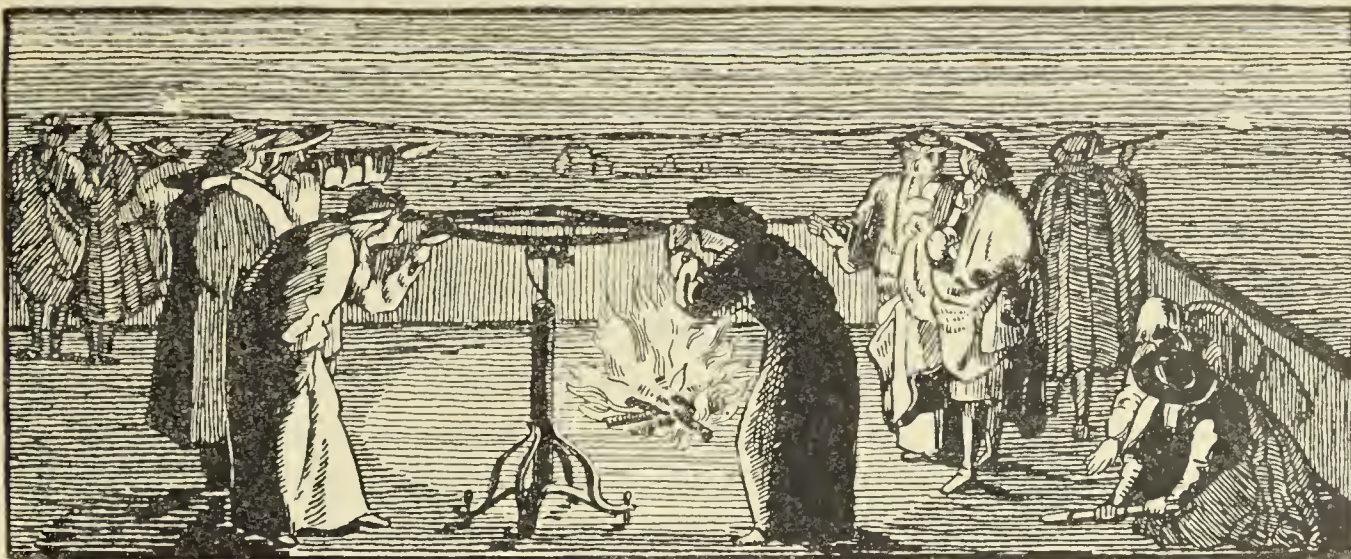
EN GÉOMÉTRIE Viète ne sépare pas la géométrie de l'algèbre et considère ces deux branches comme devant sans cesse s'aider mutuellement : tantôt il algébrise à propos de problèmes géométriques, tantôt il construit géométriquement les solutions de problèmes algébriques. Classant ces questions suivant leurs difficultés, il sait qu'à la règle et au compas, suffisants pour les problèmes dépendant d'équations des deux premiers degrés, il faut adjoindre, pour le troisième et le quatrième, l'usage des conchoïdes ou la construction des deux moyennes proportionnelles. Bien supérieur sur ce point à tous les géomètres ses contemporains, il étudie le cercle comme polygone d'un nombre infini de côtés, résout la question controversée de l'angle de contingence en montrant qu'un tel angle n'existe pas et combat victorieusement le célèbre philologue et chronologiste

gascon Joseph Scaliger, professeur à l'Université de Leyde, qui prétendait que tout l'enseignement d'Archimède était faux. Viète, à ce propos, entreprend une étude du nombre π , qu'il admet incommensurable, en donne la valeur avec dix décimales exactes, et le met sous forme d'un produit infini convergent, introduisant du même coup dans la science cette notion nouvelle et féconde de produit infini. Vainqueur du tournoi mathématique institué par Romanus, il propose à son tour aux savants de construire un cercle tangent à trois cercles donnés, problème dont Apollonius avait indiqué une solution perdue, et, publiant la sienne, où il est le premier à deviner le rôle et l'importance des centres de similitude de deux cercles, il se décerne à lui-même le nom d'Apollonius Gallus.

E^{N TRIGONOMÉTRIE} Véritable créateur enfin du calcul trigonométrique, Viète construit des tables, écrit des traités où cette science est réduite à une simplicité et une généralité jusqu'alors inconnues, et surtout possède sur la multiplication et la division des arcs des notions qui seraient absolument complètes, si là aussi il ne rejetait pas systématiquement les racines négatives. Il sait reconnaître et expliquer la multiplicité des solutions, et c'est précisément ce qui lui permet de résoudre le problème de Romanus, qui se ramenait à la division d'un arc en quarante-cinq parties égales, et d'en indiquer exactement les vingt-trois solutions positives.

R^{ENOMMÉE DE VIÈTE} Savant éminent, nous venons de le voir, Viète fut considéré comme tel par ses contemporains, qui surent reconnaître en lui le premier mathématicien de l'époque. « Homme de grand esprit et jugement, et un de nos plus doctes mathématiciens », dit le *Journal* de l'Estoile ; « jamais homme ne fut plus né aux mathématiques », écrit Tallemant des Réaux, reflétant l'opinion commune.

Admiré encore au siècle suivant, il tombe ensuite dans l'oubli ; Arago, en 1847, déclare qu'il est honteux qu'on l'ignore à ce point, et ce n'est que de nos jours que l'on s'est préoccupé de recherches sur sa vie et son œuvre. S'il semble d'ailleurs dans son siècle un isolé, s'il n'a pas formé d'élèves, il est digne cependant d'être considéré comme le premier en date dans cette glorieuse suite française de mathématiciens illustres que vont nous montrer les chapitres suivants.

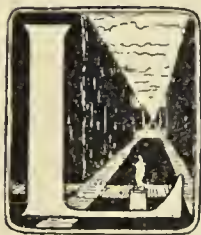


CHAPITRE II

LES MATHÉMATIQUES PURES DE DESCARTES A CAUCHY

- I. L'Académie des sciences. Le Journal des Savants. Les Académies étrangères. — II. La géométrie de Descartes et sa correspondance. Fermat. Pascal. Desargues. Roberval. Huygens. — III. Autres savants du dix-septième siècle. — IV. L'analyse infinitésimale. Le début du dix-huitième siècle. — V. Clairaut. D'Alembert. Fontaine. De Gua. Condorcet. Bezout. — VI. Lagrange. Laplace. Monge. Legendre.*

I



LA science mathématique, telle que nous la concevons et la pratiquons aujourd'hui, s'est formée par un progrès continu pendant la période d'environ deux cents ans qui s'étend depuis les premières années du dix-septième siècle jusqu'au commencement du dix-neuvième, et pour la fixer par deux noms seulement, suffisamment représentatifs, depuis Descartes jusqu'à Cauchy. C'est la période d'*invention*; en la considérant d'une façon très générale, sans prendre garde aux exceptions que réserve toujours la puissante diversité de l'esprit humain, on peut dire que, pendant cette période, les mathématiques se développent surtout pour satisfaire aux besoins sans cesse croissants de la physique, entendue dans le sens le plus large, c'est-à-dire l'étude générale des phénomènes ; c'est en vue de la solution des problèmes réels de la philosophie naturelle que se manifeste, par la création de tant de méthodes nou-

velles et fécondes, cette prodigieuse activité mathématique qui fait encore l'objet de notre admiration.

Surpris eux-mêmes, et comme emportés par leur succès, les géomètres de ce temps cèdent à leur intuition merveilleuse, qui ne les trompe pour ainsi dire jamais. Leurs raisonnements sont presque toujours précaires, et ne sauraient satisfaire les mathématiciens modernes ; leurs méthodes particulièrement hasardeuses les exposent à des périls dont leur foi dans la généralité de l'analyse ne suffit pas toujours à les sauver ; à chaque instant, ils se heurtent à des paradoxes dont l'éclaircissement donne lieu à des discussions passionnées ; mais qu'importe ? Ils vont toujours de l'avant, se mettant au-dessus des subtilités. Et s'il est vrai, d'autre part, que la science nouvelle n'a pu prendre son magnifique essor qu'en se libérant définitivement des étroites entraves de l'école, comme l'avait souhaité Ramus, combien de fois, cependant, ses conceptions restent enveloppées et obscurcies de considérations métaphysiques, dont elle n'arrive que difficilement à se dégager !

Ce n'est que plus tard, au dix-neuvième siècle, que les mathématiques seront étudiées systématiquement pour elles-mêmes, et que l'on fera la revision des résultats acquis de tant de façons diverses, pour les ranger sous les lois d'une logique rigoureuse, pour déterminer leurs rapports mutuels, les éclairer les uns par les autres, et de cette façon découvrir leurs raisons profondes.

L'ACADÉMIE DES SCIENCES La création des académies dès le dix-septième siècle a singulièrement contribué au progrès des sciences ; peut-être serait-il plus vrai de dire inversement avec Laplace que les académies deviennent nécessaires lorsque le progrès des sciences, multipliant leurs points de contact et ne permettant plus à un seul homme de les approfondir toutes, elles ne peuvent recevoir que de plusieurs savants les secours mutuels qu'elles se demandent.

L'Académie des sciences de Paris fut fondée par Colbert en 1666, avec l'approbation de Louis XIV. Mais depuis plus de trente ans, déjà, la France avait une académie des sciences sans caractère officiel ; c'était une société de savants qui se réunissaient chaque semaine pour se communiquer leurs observations et leurs découvertes, sans craindre de susciter des discussions profitables ; des hommes d'un rang élevé, aimant la science, mais sans loisirs pour s'y consacrer, se faisaient honneur d'y être admis. Le promoteur de ces réunions paraît avoir été le père Marin Mersenne, de l'ordre des Minimes, condisciple de Descartes au collège de la Flèche : médiocre géomètre, il était animé d'un zèle infatigable pour la science, soutenant que les défenseurs de la religion ne doivent pas l'ignorer, et qu'elle offre d'ailleurs

de grands avantages pour s'élever à Dieu ; pénétré de cette idée, il avait préparé, à l'usage des prédicateurs, des sermons dont le texte était par exemple une proposition d'Euclide ou d'Apollonius, ou bien encore une vue de la catoptrique. Il se tenait en correspondance régulière avec la plupart des savants les plus éminents de l'Europe, leur donnant ainsi les moyens de se connaître et de s'apprécier mutuellement ; il excitait leurs progrès en leur proposant des questions ; il recueillait



LE CABINET DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES AU PALAIS DU LOUVRE
(D'après une gravure de Sébastien Le Clerc).

et publiait les découvertes marquantes. Il a donc rendu les plus précieux services, bien qu'on puisse critiquer quelquefois son discernement. Parmi les membres de l'académie Mersenne, il faut citer Descartes, avant son départ de Paris pour la Hollande, Desargues, Roberval, Claude Mydorge, Ismaël Boulliaud, Carcavi, le président Étienne Pascal qui amenait quelquefois son jeune fils Blaise, Le Pailleur, ami des Pascal, plus tard Gassendi, etc. Après la mort de Mersenne en 1648, les réunions continuèrent d'abord chez Le Pailleur, puis chez de Montmor et enfin chez Melchisédec Thévenot.

Cette académie privée finit comme la société Valentin Conrart, devenue en 1635 l'Académie française ; elle fit place en 1666 à l'Académie des sciences. Celle-ci ne

se composait alors que de seize membres ; parmi eux, comme géomètres, Christian Huygens, alors fixé à Paris par l'accueil particulièrement flatteur qu'il avait reçu de Louis XIV, mais qui devait regagner sa patrie après la révocation de l'édit de Nantes, Roberval, Carcavi, Bernard Frénicle de Bessy ; et comme astronomes, Auzout et l'abbé Picard. Ces choix étaient à la louange de Colbert.

Dès 1699, le cadre de l'Académie fut élargi ; on y fit place en particulier à des associés étrangers, entre autres Isaac Newton, les deux frères Jacques et Jean Bernoulli, Leibniz, Rømer, Tschirnhausen : ces trois derniers, qui avaient séjourné plus ou moins longtemps à Paris, faisaient déjà partie de l'ancienne académie. Viviani, l'élève de Galilée et l'ami de Torricelli, fut nommé quelques mois après.

L'Académie des sciences subit encore quelques modifications en 1716 et en 1785, avant de disparaître momentanément en 1793, sous le régime de la Terreur ; rétablie en 1795, comme première classe de l'Institut national des sciences et arts, elle a repris définitivement son nom en 1816.

On a pu quelquefois contester l'autorité des académies et apprécier leur rôle sans bienveillance ; on a même qualifié leurs membres de « grands faiseurs de rien ». De tels reproches ne sauraient s'adresser à l'ancienne Académie des sciences : elle n'a tenu à l'écart aucun savant considérable ; elle n'a négligé aucune nouveauté, comme le démontrent surabondamment les discussions et les querelles dont elle a été bien souvent le théâtre ; si les plus belles découvertes y ont rencontré des contradicteurs acharnés, elles y ont trouvé aussi des défenseurs encore mieux armés, qui les ont fait triompher ; pour décider entre les théories adverses, lorsque le doute s'imposait encore, elle a organisé toutes les enquêtes nécessaires, afin de ne juger que d'après les résultats de l'expérience. Elle a rempli sa fonction avec prudence et dignité ; l'influence prépondérante qu'elle a exercée sur le développement des sciences est son plus haut titre de gloire.

LES PRIX DE L'ACADÉMIE

L'une des principales raisons de cette influence est l'institution des prix régulièrement décernés à partir de 1721. Rouillé de Meslay, conseiller au Parlement, avait légué à l'Académie quatre mille livres de rentes ; mais elle devait proposer tous les ans un prix de valeur égale à la moitié de cette somme pour être donné à celui qui « aurait le mieux réussi, par raison et non par éloquence, sur un traité philosophique ou dissertation touchant ce qui contient, soutient et fait mouvoir en son ordre les planètes et autres substances contenues dans l'univers, le fond premier et principal de leurs productions et formations, le principe de la lumière et du mouvement ».

Un autre prix de cinq cents livres devait être proposé tous les ans en faveur de celui qui aurait le mieux réussi dans une méthode courte et facile pour prendre plus exactement les hauteurs et degrés de longitude en mer, et en les découvertes utiles à la navigation et grands voyages.

Les idées de Meslay n'étaient pas toutes aussi louables : il avait cru par exemple qu'un coq de Portugal accoutumé de chanter à minuit, ne chanterait en France qu'à une heure du matin, et voyait là une solution du problème des longitudes. Aussi son testament fut-il attaqué par son fils ; mais l'Académie gagna son procès, qui ne dura que quatre ans. Grâce à la fondation de Meslay, l'Académie ne cessa, pendant le dix-huitième siècle, de diriger la science, en provoquant les recherches sur les problèmes importants dont la solution restait encore incertaine. Ses premiers jugements furent quelquefois malheureux : les théories de Descartes y trouvaient encore un grand nombre de fidèles soutiens. Mais bientôt sa compétence s'assura, et ses décisions méritèrent l'approbation universelle. On le comprendra sans peine quand nous aurons cité parmi les savants plusieurs fois honorés du prix, Bouguer, Jean et Daniel Bernoulli, Maclaurin, et surtout Léonard Euler et Lagrange.

LES PUBLICATIONS ACADÉMIQUES Les académies publient en général des recueils qui contiennent les travaux de leurs membres, et parmi les mémoires soumis à leur jugement, ceux qui ont été l'objet d'une distinction spéciale : elles rendent ainsi d'inappréciables services, mais le retard inévitable qui se produit dans ces publications n'est pas sans effets nuisibles. Le défaut d'actualité qui en résulte est déjà grave en lui-même ; mais, surtout, il favorise singulièrement les fâcheuses querelles de priorité dont le dix-septième et le dix-huitième siècle nous offrent tant d'exemples. À cette époque, en général, un savant ne reste pas confiné dans un coin de science, dont la propriété lui est pour ainsi dire assurée par ses longues et patientes recherches ; ses efforts se dispersent volontiers sur un domaine bien plus étendu, et dès qu'il prend connaissance d'un travail susceptible de l'intéresser, il ne peut manquer de chercher immédiatement à le perfectionner ; il voit les choses sous un angle différent, et quelquefois, une idée toute simple, à laquelle son auteur n'avait attaché aucune importance spéciale, ouvre à un autre esprit des voies entièrement nouvelles, qui le conduisent à de véritables découvertes. Si l'on se représente alors que, d'une part, les savants trouvaient toujours le moyen de faire connaître aux cercles intéressés l'essentiel de leurs œuvres nouvelles, bien avant leur publication définitive, et que, d'autre part, les acadé-

miciens lisaient réellement leurs travaux devant des confrères scrupuleusement attentifs, il est aisé de comprendre comment ont pu naître tant de querelles ou de simples froissements, plus ou moins graves suivant les caractères, souvent mal dissimulés par une feinte courtoisie, et que le temps ne réussit pas toujours à effacer. La postérité elle-même, obéissant à des influences diverses et se laissant guider par des sentiments quelquefois irraisonnés, n'est pas toujours à même de prononcer des jugements impartiaux ; d'autant que la plus minutieuse érudition, dont les savants échafaudages demeurent à la merci de la découverte d'une ligne inédite, reste quelquefois impuissante à fixer le véritable auteur de telle proposition célèbre, ou simplement d'une nouvelle façon d'envisager les choses, qui en fait constitue une révolution.

LE « JOURNAL DES SAVANTS » Les publications académiques sont insuffisantes, nous venons de le voir, pour entretenir une activité scientifique largement développée. Il faut un organe plus souple, qui permette à tous les savants de faire connaître rapidement leurs travaux, qui leur serve d'intermédiaire pour communiquer entre eux, comme avait fait Mersenne, et qui excite l'intérêt d'un plus grand nombre de lecteurs : en un mot, il faut un journal.

La première publication de ce genre est le *Journal des Savants*, fondé en 1665 par Denis de Sallo, sieur de la Coudraye, conseiller au Parlement de Paris, sous le pseudonyme d'Hédouville. Cet érudit occupait depuis longtemps déjà deux secrétaires, chargés de transcrire les extraits de ses vastes lectures ; son dessein était de faire connaître tout ce qui se passe dans la république des lettres, tout ce qui est digne de curiosité en Europe, d'analyser tous les principaux livres dès leur apparition, de communiquer toutes les nouvelles découvertes dans les arts et dans les sciences, les observations du ciel, etc. Le premier cahier parut le lundi 5 janvier 1665 ; le journal était hebdomadaire, « afin de ne pas frustrer les lecteurs de la grâce de la nouveauté. »

Le *Journal des Savants* obtint immédiatement un grand succès, qui ne tarda pas à offusquer ; la liberté nouvelle de ses critiques, plutôt encore que leur âpreté, lui suscita des ennemis puissants ; malgré la protection de Colbert, il dut disparaître au bout de trois mois, suspect de gallicanisme et de jansénisme. L'abbé Jean Galloys, savant universel, professeur de grec au Collège de France, et plus tard membre de l'Académie française et de l'Académie des sciences, reprit sa publication dès le commencement de 1666, et la continua, quelquefois irrégulièrement, pendant huit ans. En 1701, après avoir changé plusieurs fois de directeur, le journal fut acquis pour l'État par le chancelier de Pontchartrain, qui en confia la rédaction à un comité de

savants ; devenu mensuel en 1724, il disparut encore en 1792, pour renaître définitivement en 1816.

Une publication analogue au *Journal des Savants*, mais d'un caractère plus littéraire encore, est le *Journal de Trévoux*, fondé par les Jésuites en 1701 ; il cessa de paraître en 1782.

LES ACADEMIES ET LES JOURNAUX A L'ÉTRANGER

Les considérations qui précèdent, nécessaires pour bien comprendre l'histoire des sciences pendant la période qui va nous occuper, sont valables pour la plupart des pays de l'Europe. L'Italie est le berceau des académies ; l'une des plus célèbres au point de vue scientifique est l'*Accademia del Cimento*, fondée à Florence en 1657, mais qui ne dura que dix ans ; il faut citer aussi l'Académie des sciences de Turin, qui date de 1759.

En Angleterre, la *Royal Society* de Londres se constituait officiellement en 1660, après quinze ans d'existence secrète à Oxford ; son premier président fut lord Brouncker, ami de Wallis ; plus tard Newton la dirigea jusqu'à sa mort. Les mémoires de la Société royale sont les *Philosophical Transactions*, dont le premier volume correspond à l'année 1665.

L'Académie de Berlin, connue d'abord sous le nom de *Société des Sciences*, fut fondée en 1700 par l'électeur de Brandebourg, Frédéric III, sous l'influence de la princesse Sophie-Charlotte, sa femme, qui protégeait les sciences et les arts : c'était Leibniz qui avait proposé le plan de la nouvelle Académie, sur le modèle de celle de Paris, et c'est lui qui la présidait ; mais ses absences continuelles le mirent bientôt en défaveur, si bien que sa mort, survenue en 1716, passa volontairement inaperçue à l'Académie de Berlin, comme à la Société royale de Londres, tout entière dressée contre lui pour défendre les droits de Newton à l'invention du calcul infinitésimal ; à Paris, seulement, son éloge fut prononcé immédiatement par le secrétaire perpétuel Fontenelle, dans les termes qui convenaient pour honorer ce puissant génie. On trouve parmi les noms des premiers titulaires de l'Académie de Berlin beaucoup de noms français, ceux de protestants qui avaient quitté la France après la révocation de l'édit de Nantes ; et cette constatation, qui se reproduit dans bien des cas analogues, ne va pas sans quelque amertume.

Frédéric II tint à honneur de donner un nouvel éclat à son Académie, qui n'avait eu qu'une ombre d'existence sous le règne de son père : il recruta pour elle les savants les plus renommés de tous les pays. Maupertuis, qui s'était acquis une immense réputation par son expédition heureuse en Laponie et par l'ardeur qu'il mettait à dé-

fendre les théories de Newton, fut appelé par Frédéric, comme apôtre de la vérité, à la présidence générale de l'Académie restaurée; Voltaire l'avait recommandé, mais ne lui pardonna pas son succès, car probablement avait-il désiré cette haute distinction pour lui-même.

Le règlement de l'Académie avait été rédigé en français; les mémoires devaient être écrits dans la même langue; pour les lectures seulement on pouvait user du latin,

exceptionnellement de l'allemand, mais, par courtoisie pour Maupertuis, on s'efforçait à baragouiner un français informe. La trop fameuse querelle de Maupertuis avec Samuel Kœnig au sujet de la découverte et de la valeur du principe de la moindre action, envenimée par les soins de Voltaire, ne laissa que des vaincus. Maupertuis quitta Berlin en 1756, pour aller mourir à Bâle, trois ans après.

Ce fut Euler qui exerça la présidence après lui, sans titre officiel: Frédéric II voulait avoir d'Alembert; mais celui-ci passa seulement trois mois auprès du roi en 1763, et s'il dirigea indirectement l'Académie de Berlin, ce fut seulement



MAUPERTUIS
(D'après un tableau de Tournières).

par les conseils que lui demandait Frédéric; c'est ainsi que Lagrange fut appelé en 1766 pour présider la classe des mathématiques. Après la mort de d'Alembert en 1783, Condorcet lui succéda dans son rôle de conseiller; mais la disparition de Frédéric II en 1786 vint bien vite terminer ce qu'on peut appeler la période française de l'Académie de Berlin: dès l'année suivante, Lagrange venait se fixer définitivement à Paris.

L'Académie de Saint-Petersbourg, dont Pierre le Grand avait dressé le projet en 1724, fut établie l'année suivante par sa veuve Catherine I^{re}; elle fut illustrée surtout par Euler.

Le *Journal des Savants* servit de modèle à l'étranger pour de nombreuses publications similaires; entre autres, les *Acta eruditorum* de Leipzig en 1682, les *Nouvelles de la République des Lettres*, fondées par Bayle en Hollande, etc.

L E RÔLE DE LA FRANCE L'influence de la France sur le mouvement scientifique aux dix-septième et dix-huitième siècles ressort suffisamment de ce qui précède. D'autre part, les noms des savants illustres à la même époque sont, en se bornant à ceux que tout le monde connaît : Galilée, Képler, Néper, Descartes, Pascal, Fermat, Huygens, Wallis, Newton, Leibniz, les Bernoulli, Clairaut, d'Alembert, Euler, Lagrange, Laplace, Legendre, Monge. On voit qu'ici encore la part de la France est la meilleure. Il faut observer, au surplus, que si le sentiment national est nettement marqué chez les Anglais et les Français, qui sortent peu de chez eux, il l'est infiniment moins chez d'autres plus cosmopolites, Euler et Lagrange, par exemple, dont peuvent se réclamer à des titres divers, et suivant les périodes de leur vie, plusieurs nations. La science devient d'ailleurs de plus en plus internationale, et pour suivre l'histoire de son développement dans un pays, il est souvent nécessaire de dépasser les frontières.

II

L A GÉOMÉTRIE DE DESCARTES L'événement scientifique le plus important pendant la première moitié du dix-septième siècle est sans contredit l'apparition en 1637 du *Discours de la méthode pour bien conduire sa raison et chercher la vérité dans les sciences; plus la Dioptrique, les Météores et la Géométrie, qui sont des essais de cette méthode*. Cet ouvrage capital, qui a exercé une influence sans précédent sur le développement des sciences comme sur celui de la philosophie, était le fruit des longues méditations de René Descartes du Perron, retiré en Hollande depuis 1629; sa biographie est suffisamment connue par ailleurs pour qu'il soit inutile de la rappeler ici.

Descartes a écrit lui-même que sa *Géométrie*, qui seule doit nous occuper, n'a été composée que pendant qu'on imprimait ses *Météores*, et même qu'il en a inventé une partie pendant ce temps-là; on doit le croire, mais sans doute en possédait-il déjà tout l'essentiel, et depuis longtemps.

La *Géométrie* est pour Descartes une illustration de sa *méthode* : les problèmes relatifs aux grandeurs et aux figures, envisagés du point de vue algébrique, peuvent être rangés par ordre de complication; tous ceux d'un même genre sont résolus de la même façon; quand ce genre s'élève, la solution se modifie conformément à des règles constantes, de sorte qu'on peut parvenir à résoudre tous les problèmes en

suivant une voie régulière. Ouvrir cette voie entièrement nouvelle, en parcourir les premières étapes, et après en avoir affirmé l'infailible sûreté, laisser à ses successeurs le soin de s'y avancer toujours plus loin, tel est l'objet que se propose Descartes. Il faut ajouter que, suivant son habitude, il se montre hautain et dédaigneux ; peu soucieux de faciliter l'intelligence de sa pensée, il reste souvent obscur à dessein (il l'a confessé lui-même), comme s'il voulait seulement montrer à ses contemporains combien il se sent au-dessus d'eux.

La *Géométrie* n'est qu'un opuscule, divisé en trois livres, mais d'une richesse extraordinaire en idées nouvelles. Dès le début, Descartes étend à la géométrie les opérations de l'arithmétique, et montre, par exemple, pour nous borner au cas le plus élémentaire, comment on peut représenter par une ligne toute simple, grâce au choix d'une unité, le produit de deux lignes, en construisant une quatrième proportionnelle. C'est là une conception vraiment révolutionnaire, que les anciens géomètres auraient repoussée avec horreur : pour eux, le produit de deux lignes ne pouvait avoir d'autre signification qu'une surface.

La méthode générale pour résoudre les problèmes par l'analyse est ensuite expliquée dans des termes qui méritent d'être rappelés, car on chercherait vainement à dire mieux : « Ainsi, voulant résoudre quelque problème, on doit d'abord le considérer comme déjà fait, et donner des noms à toutes les lignes qui semblent nécessaires pour le construire, aussi bien à celles qui sont inconnues qu'aux autres. Puis, sans considérer aucune différence entre ces lignes connues et inconnues, on doit parcourir la difficulté selon l'ordre qui montre le plus naturellement de tous en quelle sorte elles dépendent mutuellement les unes des autres, jusques à ce qu'on ait trouvé moyen d'exprimer une même quantité en deux façons, ce qui se nomme une équation... »

En traitant comme application le célèbre problème de Pappus, dont les anciens n'avaient pu donner que des solutions incomplètes, Descartes est amené à préciser ses idées : notre géométrie analytique apparaît tout entière dans cette phrase, d'apparence peu claire peut-être, mais chargée de sens : « Pour comprendre ensemble toutes les lignes courbes qui sont en la nature, et les distinguer par ordre en certains genres, je ne sache rien de meilleur que de dire que tous les points de celles qu'on peut nommer géométriques ont nécessairement quelque rapport à tous les points d'une ligne droite, qui peut être exprimé par quelque équation, en tous par une même. »

Descartes insiste sur le fait que l'équation d'une courbe permet l'étude de toutes ses propriétés, en particulier la détermination de leurs tangentes, le problème le

plus utile et le plus général qu'il ait jamais désiré de savoir en géométrie. Mais son procédé est indirect et d'essence algébrique ; il détermine seulement le pied de la normale comme centre d'un cercle coupant la courbe en deux points confondus ; il lui faut donc écrire qu'une équation a une racine double, et il use à cet effet de la méthode des coefficients indéterminés, dont il se fait honneur.

Après quelques mots sur la possibilité d'étendre sa méthode à l'espace, Descartes termine la *Géométrie* par un traité d'algèbre. On y trouve la préparation des équations, leurs transformations simples, la recherche des racines commensurables au moyen de la division algébrique, etc. Les racines négatives sont dites fausses ou moindres que rien, et désignées par leur valeur absolue : sans doute Descartes connaissait parfaitement les nombres négatifs, mais il est peu explicite à ce sujet. Il distingue aussi les racines réelles ou imaginaires, mais ces mots qui paraissent pour la première fois dans la science ne reçoivent aucune signification précise.

Le géomètre flamand Albert Girard avait mieux réussi dans sa façon de comprendre les racines négatives et imaginaires, et son *Invention nouvelle en l'algèbre*, de 1629, ne devait pas être inconnue de Descartes. Ce qui est véritablement nouveau dans cette dernière partie de la *Géométrie*, c'est la fameuse règle des signes pour déterminer une limite du nombre des racines vraies ou fausses, énoncée en quelques lignes, sans démonstration, et comme perdue au milieu de propositions de bien moindre importance et quasi évidentes : Cardan en avait jadis signalé des cas particuliers ; en se rappelant le voyage de Descartes en Italie, on peut voir là l'origine de son théorème général. Une autre chose nouvelle est la résolution de l'équation du quatrième degré par la décomposition en facteurs du second degré.

L'ouvrage se termine par la construction géométrique des racines des équations de degré quelconque ; mais Descartes se trompe, en indiquant de trop grandes valeurs pour les degrés des courbes nécessaires. Ajoutons enfin que les notations de la *Géométrie* sont à bien peu de chose près celles qui nous sont encore familières : c'est qu'elles avaient, pour la première fois, les qualités requises pour constituer l'auxiliaire vraiment commode, indispensable aux algébristes, et sans lequel le progrès devient presque impossible. En résumé, on voit que la *Géométrie* est bien loin d'être un traité de géométrie analytique, comme on se le figure quelquefois ; elle la contient si l'on veut, mais à condition de l'y découvrir ; on n'y trouve pas, par exemple, l'équation de la ligne droite. D'ailleurs, l'application mutuelle de l'algèbre à la géométrie n'est rien moins qu'une idée nouvelle, et les principes mêmes de la géométrie analytique, telle que nous l'entendons, sont peut-être plus explicitement exprimés par Fermat que par Descartes ; ce qui fait l'originalité propre de ce dernier, encore

une fois (et il en a pleine conscience), c'est l'application d'une méthode et la généralité des conceptions.

CRITIQUES ET DÉFENSEURS DE DESCARTES

L'ouvrage de Descartes était difficile à comprendre pour les contemporains ; il choquait trop d'habitudes acquises ; rien ne paraissait acceptable en dehors de la façon de raisonner des anciens. Il rencontra donc de nombreux contradicteurs. Roberval fut des premiers ; il prétendit bien à tort relever plusieurs fautes dans la *Géométrie* de Descartes, et s'y obstina longtemps, malgré l'évidence. Un peu plus tard, Wallis soutenait que toute l'algèbre de Descartes n'était qu'un plagiat de l'*Artis analyticae praxis* de Harriot ; mais sa partialité pour son compatriote prêtait à celui-ci bien des choses qui, en réalité, lui étaient restées parfaitement étrangères. C'était surtout la façon un peu ambiguë dont Descartes avait énoncé sa règle des signes, qui excitait les critiques, et Rolle s'y attardait encore en 1684.

Par contre, un zélé partisan de Descartes fut son ami Florimond de Beaune, conseiller au présidial de Blois. La *Géométrie* n'eut pas plus tôt vu le jour, dit Montucla, que de Beaune la lut et en pénétra tous les mystères ; mais il ne se borna pas à l'entendre, il entreprit de la faire entendre aux autres, par des notes qu'il rédigea et qu'il communiqua à Descartes : celui-ci, en les approuvant, lui répondit qu'il n'en avait pas trouvé un seul mot qui ne fût selon son sens. En particulier, de Beaune imagine une méthode pour déterminer les limites des racines d'une équation ; il soulève le premier la question de déterminer une courbe par une propriété donnée de sa tangente, connue par la suite sous le nom de méthode inverse des tangentes, en proposant un problème resté longtemps célèbre sous son propre nom, et dont la solution complète exigeait le secours du calcul infinitésimal.

Les *Notæ breves* de Florimond de Beaune furent imprimées à la suite de la seconde édition latine de la *Géométrie* de Descartes donnée en 1659 par le géomètre hollandais François Schooten, avec additions et commentaires. C'est d'ailleurs en Hollande que la géométrie analytique fit ses premiers progrès, et parmi ses promoteurs, il faut distinguer le grand pensionnaire Jean de Witt.

LA CORRESPONDANCE DE DESCARTES

Descartes entretenait une importante correspondance avec ses amis, en particulier avec le père Mersenne ; publiée pour la première fois en 1667 par Claude Clerselier, avocat au Parlement de Paris, elle est précieuse pour l'histoire des mathématiques ; on y suit le développement des querelles de Descartes avec Fermat et Roberval, sur

lesquelles nous aurons à revenir ; on y voit comment il modifie quelques-unes de ses méthodes primitives, notamment celle des tangentes, mais en gardant les mêmes principes ; on y trouve, à propos de la tangente à la cycloïde, qui, par sa nature mécanique, échappait aux procédés de la *Géométrie*, la première esquisse de la théorie du centre instantané de rotation. Signalons encore un fragment, qui vient d'une copie de Leibniz, et dans lequel on trouve l'importante proposition de la théorie des polyèdres connue sous le nom de théorème d'Euler.

FERMAT Pierre de Fermat est né en 1601 à Beaumont-de-Lomagne, près de Montauban ; entré au Parlement de Toulouse en 1631 comme conseiller, anobli peu après suivant l'usage, il accomplit avec zèle et distinction les devoirs de sa charge, jusqu'à sa mort survenue à Castres en 1665 : nous ne voyons pas qu'il ait jamais quitté le Midi de la France, et le calme dans lequel s'est déroulée son existence contraste singulièrement avec l'agitation de la vie de Descartes. La même opposition se retrouve dans les caractères : Fermat n'était pas querelleur, il ignorait la rancune, et s'il fait preuve quelquefois d'une pointe de vanité, ce n'est que par jeu de Gascon.

Il était excellent humaniste, connaissait parfaitement les anciens, faisait même des vers latins, français et espagnols ; mais les mathématiques le passionnaient. Quand il mourut, sa réputation était universelle, et on fit son éloge comme du plus grand géomètre de l'Europe : cependant, on n'avait de lui que quelques fragments imprimés, formant par exemple supplément au *Cursus mathematicus* de Pierre Hérigone et à l'ouvrage du père Lalouvière sur la cycloïde, ou bien encore recueillis par Mersenne dans ses *Cogitata physico-mathematica*. C'est que Fermat travaillait pour sa propre satisfaction, et surtout de tête : le plus souvent, il se contentait d'annoter les marges de ses livres. Ses œuvres et sa correspondance ne furent réunies qu'avec beaucoup de difficultés par son fils Samuel, d'une façon bien incomplète, d'autant plus qu'il se heurta, en remplissant ce pieux devoir, à la mauvaise volonté de Carcavi, on ne sait pourquoi. Carcavi avait été d'abord le collègue et l'ami de Fermat au Parlement de Toulouse ; venu à Paris en 1636, il le mit en relations avec Mersenne, Roberval, Étienne Pascal, etc. ; et c'est lui qui avait hérité de ses papiers.

En annonçant la mort de Fermat, le *Journal des Savants* nous apprend qu'il excellait dans toutes les parties des mathématiques, mais principalement dans la science des nombres et la belle géométrie. Un regard sur l'œuvre si variée de Fermat suffira pour nous montrer que cet éloge reste bien au-dessous de la vérité ; ce que

ne pouvait pas encore voir son auteur, c'est que Fermat a ouvert dans les différents domaines de la mathématique des voies nouvelles dont l'exploration n'est pas encore achevée, et que l'histoire impartiale devait reconnaître en lui le premier inventeur du calcul infinitésimal. Le génie de Fermat en fait un des plus grands parmi les grands mathématiciens.

LA THÉORIE DES NOMBRES

Bachet de Méziriac avait donné en 1621 une bonne édition de Diophante, avec des notes et additions ; c'est sur les marges d'un exemplaire de cet ouvrage que Fermat consignait ses observations, c'est-à-dire les énoncés des propositions nouvelles que lui suggérait l'étude assidue du volume ; les démonstrations manquent toujours, car la place lui fait défaut ; avait-il dessein de les communiquer un jour ? Les possédait-il toutes complètes, ou bien se laissait-il guider par une induction quelquefois trop hasardeuse ? Il est impossible de répondre à ces questions.

Les propositions de Fermat sont très variées ; elles se rapportent à la représentation des nombres comme sommes de carrés ou de nombres triangulaires, aux nombres premiers, aux nombres parfaits, aux carrés magiques, etc. Plusieurs sont restées célèbres sous le nom même de l'auteur ; son grand théorème sur l'impossibilité de mettre la n^{e} puissance d'un nombre entier sous la forme d'une somme de deux puissances pareilles, dès que l'exposant n dépasse 2, fait encore le désespoir des mathématiciens, qui, malgré les ressources d'une profonde analyse bien inconnue de Fermat, n'ont réussi ni à le démontrer dans toute sa généralité, ni à lui trouver des cas d'exception ; et cependant son auteur déclare en avoir une démonstration vraiment admirable.

D'autres propositions de Fermat, en petit nombre, ont été reconnues par la suite comme inexactes, du moins sous leur forme générale.

Le *Diophante* annoté de Fermat fut publié par son fils dès 1670, précédé d'un traité d'analyse indéterminée, rédigé sous le titre de *Doctrinæ analyticæ inventum novum*, d'après des lettres de l'illustre géomètre, par le père jésuite Jacques de Billy, professeur à Dijon. Mais l'attention du monde savant fut bientôt détournée de ce genre de recherches par les progrès de l'analyse infinitésimale ; plus tard seulement, Euler la réveilla, bientôt suivi par Lagrange.

Suivant l'habitude du temps, Fermat proposait aux savants de nombreux problèmes, comme on le voit dans sa correspondance avec Mersenne, Frénicle, Roberval ; par l'intermédiaire de Kenelm Digby, il avait défié tous les géomètres contemporains et en particulier les Anglais, au sujet de l'équation connue depuis sous le nom de

Pell, bien que celui-ci n'ait eu d'autre mérite que de réimprimer la solution donnée immédiatement par Wallis et lord Brouncker comme réponse au défi de Fermat.

Le succès des recherches arithmétiques demande une ingéniosité spéciale, plutôt que des méthodes rigides : cependant, Fermat écrivait à Roberval (1636) : « Pour ce qui est des nombres et de leurs parties aliquotes, j'ai trouvé une méthode générale pour soudre toutes les questions par algèbre, de quoi j'ai fait dessein d'écrire un petit traité. » Ce traité n'a jamais vu le jour, mais dans un fragment intitulé *Relation des découvertes en la science des nombres* et qui n'a été retrouvé que vers la fin du siècle dernier dans les papiers de Huygens, Fermat explique en quoi consiste sa méthode, qu'il appelle la *descente infinie ou indéfinie* ; si par exemple on veut prouver qu'un problème donné n'admet pas de solution en nombres entiers, il suffira de montrer que s'il en admettait une, il en admettrait une autre en nombres plus petits ; et par un biais convenable, cette méthode s'applique aussi bien aux propositions affirmatives qu'aux négatives. A la vérité, le principe s'en trouve déjà dans Euclide, et son emploi est devenu fréquent en arithmétique supérieure ; mais le mérite de Fermat reste entier d'en avoir vu la haute portée.

Les dernières lignes de la *Relation* ne peuvent qu'aviver notre regret de ne pas mieux connaître le secret de Fermat : « En tout cas, cette indication servira aux savants pour trouver d'eux-mêmes ce que je n'entends point... Et peut-être la postérité me saura gré de lui avoir fait connaître que les anciens n'ont pas tout su, et cette relation pourra passer dans l'esprit de ceux qui viendront après moi pour *traditio lampadis ad filios*, comme parle le grand chancelier d'Angleterre, suivant le sentiment et la devise duquel j'ajouterai, *multi pertransibunt et augebitur scientia*. »

LA MÉTHODE « DE MAXIMIS ET MINIMIS » Fermat était en possession dès 1629 de sa méthode pour résoudre les questions relatives aux maximums et minimums, qui est peut-être le plus éclatant témoignage de son génie ; il l'avait communiquée à un sieur Despagne de Bordeaux, et c'est par Despagne que Roberval l'a connue. Cette méthode n'a été publiée définitivement qu'en 1679 (*Methodus ad inquirendam maximam et minimam*) ; à peu près ignorée des contemporains, elle ne semble pas avoir eu d'influence sur Leibniz et Newton. Cependant, on y trouve de la façon la plus nette les conceptions fondamentales du calcul infinitésimal. Réalisant pour la première fois par le calcul l'idée entrevue déjà par Nicole Oresme, et plus tard par Képler, Fermat détermine le maximum ou minimum d'une fonction en donnant à la variable deux valeurs consécutives, a et $a + e$ par exemple, et en égalant les valeurs correspondantes de la fonction ; après simplifi-

cation, il ne reste qu'à annuler l'accroissement e . Fermat avait donc vu le problème sous son véritable aspect ; ses successeurs ont donné les règles nécessaires pour diriger et simplifier le calcul ; ils ont précisé les résultats ; mais sa conception géniale reste la base inébranlable de l'analyse, et c'est à bon droit qu'on peut le dire avec d'Alembert, Lagrange, Laplace, le véritable inventeur du calcul différentiel.

La méthode de Fermat s'étend elle-même au problème des tangentes, en considérant que la tangente en un point d'une courbe contient aussi le point infiniment voisin ; pour soumettre la question au calcul, il faut connaître l'équation de la courbe, ou du moins sa *proprietas specifica*, comme dit Fermat : et en effet, il avait une idée parfaitement nette, lui aussi, de la géométrie analytique.

La solution du problème des tangentes par Fermat, d'une portée bien supérieure à celle de Descartes, fut communiquée à celui-ci par Mersenne en 1638 ; Descartes ne la comprit pas, ou ne voulut pas la comprendre, et y fit des objections insoutenables ; mais on sait qu'il avait pris en mauvaise part les critiques de Fermat au sujet de sa *Dioptrique*. La querelle se prolongea quelques mois ; les tenants de Fermat étaient Étienne Pascal et Roberval ; Desargues, Mydorge et Hardy soutenaient Descartes ; cette petite guerre se termina par des échanges de politesses, sincères chez Fermat qui avait fait les premières avances en écrivant directement à Descartes ; pour celui-ci, persuadé d'avoir conservé l'avantage, Fermat resta « le conseiller *de minimis* ».

AUTRES TRAVAUX DE FERMAT Comme nous l'avons déjà fait remarquer, Fermat fait usage de la géométrie analytique tout aussi bien que Descartes, quelquefois plus correctement ; dans son *Ad locos planos et solidos isagoge*, son point de vue sur cette science, plus voisin du nôtre que celui de Descartes, est fort clairement exposé ; sans doute il ne la rattache pas à une *méthode* pour n'en faire qu'une branche de la mathématique universelle, mais par contre il ne s'embarrasse pas d'une métaphysique incertaine pour lui apporter des restrictions inutiles. Il faut regretter seulement qu'il n'ait pas su s'affranchir des notations encombrantes de Viète.

Fermat s'est occupé aussi de géométrie pure, selon la méthode synthétique des anciens ; il avait découvert dans ce domaine, écrit-il à Roberval, des choses ignorées et admirables. En algèbre, il expose des vues exactes sur l'élimination, et s'en sert habilement pour le débrouillement des asymétries, c'est-à-dire pour rendre rationnelles les équations embarrassées de radicaux. Une remarque très simple sur la théorie des progressions géométriques le mène à la quadrature des paraboles et

hyperboles de tous ordres, bien plus facilement que Cavalieri avec sa théorie des indivisibles ; un autre chapitre de calcul intégral, celui de la rectification des courbes, lui doit encore des progrès importants. Descartes, oublieux de ses propres principes, ne pensait pas qu'on pût rectifier les courbes géométriques (c'est-à-dire algébriques) à cause que « la proportion qui est entre les droites et les courbes n'étant pas connue, et même, je crois, ne le pouvant être par les hommes, on ne pourrait rien conclure de là qui fût exact et assuré » ; suivant la même idée digne de la scolastique, de Sluse, le savant chanoine de Liège, disait qu'on « doit admirer l'ordre de la nature qui ne permet point qu'on trouve une droite égale à une courbe, qu'après qu'on a déjà supposé l'égalité d'une droite à une courbe », ainsi qu'il arrive dans le cas de la cycloïde. Fermat rectifie cependant la parabole semi-cubique et d'autres courbes algébriques (vers 1659) ; il avait été devancé de peu par van Heuraet, certainement à son insu.

Enfin Fermat partage avec Pascal l'honneur de l'invention du calcul des probabilités ; nous reviendrons plus loin sur ce point.

Les deux grands noms de Descartes et de Fermat se trouvent associés plus d'une fois dans ce qui précède, le plus souvent en opposition. Il serait vain de chercher à choisir entre eux, pour dire le plus grand ; car si, du point de vue purement mathématique, Fermat semble décidément devoir l'emporter, il ne faut pas oublier, d'autre part, l'influence extraordinaire exercée par les idées de Descartes sur le développement de la pensée humaine, et l'on doit reconnaître en lui l'un de ces personnages privilégiés dont le nom suffit à caractériser une époque.

P^{ASCAL} Un troisième nom, celui de Pascal, vient s'ajouter à ceux de Descartes et de Fermat pour assurer la splendeur de l'épanouissement scientifique de la France au milieu du dix-septième siècle.

Comme Descartes, Pascal relève de l'histoire littéraire autant que de l'histoire scientifique ; il est donc superflu de retracer ici sa trop courte existence (1623-1662), et ses travaux mathématiques doivent seuls retenir notre attention.

On connaît, par les récits de sa sœur, Mme Périer, la merveilleuse précocité mathématique dont Blaise Pascal avait fait preuve, à peine âgé de treize ans. De ses premiers travaux de géométrie, il nous reste seulement l'*Essai pour les coniques*, petit placard en forme d'affiche, imprimé à Paris en 1640. Ce n'est qu'un programme, où Pascal énonce d'abord le célèbre théorème qui a gardé son nom, relatif à l'hexagone inscrit dans une conique, l'*hexagramma mysticum* : c'est le lemme fondamental d'où tout le reste doit se déduire. Pascal reconnaît d'ailleurs Desargues pour son inspira-

teur, il en adopte le langage et les idées, donnant à ses énoncés le même caractère de généralité, sans distinguer entre les différents genres de sections coniques. Mais nous savons par son adresse de 1654 à l'Académie parisienne, prolongement de l'Académie Mersenne, que Pascal avait réellement composé dès l'âge de seize ans un traité complet des coniques ; le manuscrit fut communiqué à Leibniz, qui en réclama vainement (1676) la publication aux neveux de Pascal. D'après sa lettre, nous pouvons préjuger que c'était un ouvrage fort complet ; Mersenne a dû le connaître, puisqu'il dit en 1644 que Pascal avait tiré de son seul théorème quatre cents conséquences qui comprenaient, et au delà, toute l'œuvre d'Apollonius.



BLAISE PASCAL
(D'après une gravure de D. Sornique).

Vers 1642, à l'âge de dix-neuf ans, Pascal conçut le plan de sa machine arithmétique : son but immédiat était de soulager son père que l'administration financière de la généralité de Rouen condamnait alors à des opérations longues et fastidieuses, qu'il fallait exécuter par les méthodes du jeton ou de la plume. Ce ne fut pas sans de grandes peines qu'il parvint à réaliser son idée,

ne trouvant pas d'ouvriers assez habiles ; encouragé par le chancelier Pierre Séguier, il essaya plus de cinquante modèles, tous différents. Le principe essentiel de la machine est indiqué fort clairement dans le privilège qu'il obtint en 1649 ; il consiste en ce que chaque roue d'un ordre faisant un mouvement de dix figures arithmétiques fait mouvoir la prochaine d'une figure seulement.

La machine de Pascal, la *Pascaline*, a été perfectionnée dans la suite, d'abord par Leibniz en 1673 ; mais son principe a subsisté : il est la propriété de Pascal, bien que dans les *Disciplinæ mathematicæ* du jésuite hollandais Jean Ciermans, publiées en 1640, il soit question d'un appareil à roues pour effectuer sans erreurs les multiplications et divisions, mais sans aucune description.

LA NAISSANCE DU CALCUL DES PROBABILITÉS L'année 1654 est une époque de grande activité mathématique pour Pascal : dans l'adresse à l'Académie dont nous avons déjà parlé, il annonce de nombreuses recherches arithmétiques et géométriques, qui ne nous sont pas toutes parvenues, peut-être parce qu'il n'a pas donné suite à tous ses projets. Parmi ces recherches, il faut distinguer spécialement celles relatives à la géométrie du hasard : c'est la naissance du calcul des probabilités, qui devait bientôt prendre un extraordinaire développement.

Le chevalier de Méré, qu'avait connu Pascal quand il se mêlait avec plaisir à la vie du monde, était joueur, et aimait à observer les chances des joueurs ; mais, faute d'y raisonner en géomètre, il ne parvenait pas toujours à les expliquer ; en particulier, il n'avait jamais pu trouver la juste valeur des partis, ni de biais pour y arriver. On sait en quoi consiste ce problème fameux : deux personnes jouent ensemble, et celle qui aura gagné la première n coups doit emporter l'enjeu ; elles se séparent avant que cette condition soit remplie, ayant gagné chacune un certain nombre de coups inférieur à n ; quels sont leurs partis respectifs, c'est-à-dire de quelle façon doivent-elles se partager équitablement l'enjeu ?

Méré avait posé la question à Pascal, qui la résolut immédiatement d'une façon générale à l'aide de son *triangle arithmétique* ; il correspondit aussi sur ce sujet avec Fermat, qui traita le problème par la méthode des combinaisons, d'une portée évidemment supérieure, et arriva aux mêmes résultats, car, au moins en mathématiques, « la vérité est la même à Toulouse et à Paris ». Ces premiers essais de calcul des probabilités furent sans doute communiqués à l'Académie parisienne ; mais ils semblent y avoir été accueillis sans intérêt, et plutôt par des objections spécieuses. Cependant Huygens a dû en entendre parler pendant son séjour à Paris de 1655, et c'est là sans doute l'origine de son opuscule *De ratiociniis in ludo aleæ* de 1657.

On peut trouver une ébauche du triangle arithmétique dans l'*Arithmetica integra* de l'Allemand Michel Stifel (1544) : mais l'usage qu'en fait Pascal pour résoudre toutes sortes de questions sur les nombres figurés, sur la théorie des combinaisons et sur les partis des joueurs est admirable. C'est dans le traité du triangle arithmétique que l'on rencontre pour la première fois l'application régulière de la méthode de raisonnement si importante en mathématiques, connue sous le nom d'induction complète.

Dans le même ordre d'idées, Pascal nous a laissé plusieurs autres petits traités ; en particulier, il calcule d'une façon générale la somme des puissances semblables des termes d'une progression arithmétique, et en déduit comme conséquence immé-

diate la quadrature des paraboles d'ordre entier quelconque, que Cavalieri n'avait entrevue que par induction. Dans un autre opuscule, il traite la question des caractères de divisibilité par un module quelconque ; il observe que sa méthode, maintenant encore en usage, est valable quelle que soit la base du système de numération, et il fait preuve ainsi une fois de plus de son aptitude à saisir dans leur ensemble toutes les conséquences d'un principe unique.

LES DERNIERS TRAVAUX DE PASCAL

Depuis sa conversion définitive, Pascal avait renoncé à la science humaine ; mais il était né géomètre, et comme tel, trompait-il ses cruelles insomnies en faisant de la géométrie. C'est ainsi qu'il fut amené à trouver une quantité de théorèmes nouveaux sur la cycloïde ou roulette ; il se serait volontiers contenté de la satisfaction intime que lui procuraient ces découvertes, si le duc de Roannez et d'autres amis ne lui eussent représenté que faire reconnaître son habileté en mathématiques lui apporterait un surcroît d'autorité grandement favorable à la cause religieuse qu'il défendait alors avec tant d'ardeur. Cédant à ces instances, il fit de ses théorèmes l'objet d'un défi anonyme aux géomètres du monde entier, au mois de juin 1658 : deux prix étaient institués, le premier de quarante doublons d'Espagne, le second de vingt ; Carcavi en était le dépositaire.

Il serait trop long de rapporter ici l'histoire entière de ce concours, qui excita beaucoup de passions ; sans vouloir y prendre part, Fermat et l'Anglais Wren, architecte de Saint-Paul de Londres, résolurent une grande partie des questions proposées ; les deux seuls concurrents, le père Lalouvière, jésuite de Toulouse, et Wallis, furent évincés. Sous le pseudonyme d'Amos Dettonville, anagramme du nom de Louis de Montalte duquel il avait signé les *Lettres à un provincial* (probablement en souvenir de ses expériences du Puy-de-Dôme qui lui avaient valu ses premiers démêlés avec les jésuites), Pascal publie alors une histoire de la roulette, où il fait preuve d'une grande partialité en faveur de son ami Roberval contre Torricelli, puis un certain nombre de traités préliminaires, d'où découlera sans peine la solution des problèmes posés. Dans ces traités, Pascal se montre parfaitement au courant de la théorie des indivisibles de Cavalieri comme des méthodes de Grégoire de Saint-Vincent, mais il les délivre de leurs obscurités, et les rend singulièrement plus fécondes ; il use d'artifices géométriques remarquables pour établir toutes les formules de quadrature qui lui seront nécessaires, et qui présentent déjà une assez grande complication ; toutefois, faute d'un mode de représentation convenable, son style est difficile, et ses développements sont prolixes. Malgré ces défauts, on peut encore associer ici les

noms de Pascal et de Fermat, en disant que si Fermat a su mettre en lumière le premier le véritable principe du calcul différentiel, Pascal est aussi, parmi tous les géomètres contemporains, celui qui a montré le plus de pénétration pour l'intelligence et le maniement du calcul intégral.

Enfin, il ne faut pas oublier que, comme Descartes, Pascal s'est préoccupé plus d'une fois de fixer, du point de vue philosophique, les règles du raisonnement mathématique.

DESARGUES Nous avons déjà rencontré plusieurs fois le nom de Girard Desargues, né à Lyon en 1593, mort en 1662 : véritable créateur de la géométrie pure, au sens moderne, il est resté parfaitement oublié pendant près de deux siècles. Il fut cependant très estimé par les meilleurs esprits de son temps ; Descartes le faisait juge de ses profondes méditations, se fiant plus à lui seul qu'à trois théologiens ; Fermat écrivait à Mersenne : « J'estime beaucoup M. Desargues, et d'autant plus qu'il est lui seul inventeur de ses coniques. Son livret, qui passe, dites-vous, pour jargon, m'a paru très intelligible et très ingénieux. » Il faut dire en effet que Desargues se vantait de ne rien lire, tirant tout de son propre fond, et qu'il usait d'un langage très particulier.

Desargues était venu à Paris peu après 1620 ; apprécié de Richelieu, il avait pris part au siège de la Rochelle comme ingénieur militaire ; plus tard, il fut consulté pour la construction d'un nouvel hôtel de ville à Lyon, sa patrie, et il exécuta dans cette ville plusieurs travaux d'architecture remarquables par leur hardiesse. Il enseignait gratuitement le trait de perspective et la coupe des pierres pour soulager le travail des artisans par la subtilité de ses inventions ; il s'occupait aussi de gnomonique. Il a publié des ouvrages sur ces divers sujets en 1636 et 1640 ; plusieurs d'entre eux ne nous sont parvenus que par l'intermédiaire de son élève favori, le célèbre graveur Abraham Bosse, qui a développé quelques années plus tard les méthodes de Desargues, en usant malheureusement d'un style si fâcheux qu'il a plutôt contribué à les ensevelir dans la poussière, suivant l'expression de Montucla. Cet historien consciencieux et érudit n'avait pas su apprécier la caractère d'universalité qui en faisait la qualité supérieure : c'est Poncelet qui devait le premier reconnaître le génie de Desargues, l'appelant à juste titre le Monge de son siècle.

Le principal ouvrage de Desargues, publié à Paris en 1639, était intitulé : *Brouillon-project d'une atteinte aux événements des rencontres d'un cône avec un plan*, et suivi d'une *Atteinte aux événements des contrariétés d'entre les actions des puissances ou forces*. En lisant ces mots, on ne peut s'empêcher de donner décidément quelque peu raison

à Mersenne, qualifiant de jargon la façon d'écrire de Desargues. Aucun exemplaire imprimé de cet ouvrage n'a subsisté ; nous n'en connaissons qu'une copie manuscrite prise par Philippe de La Hire en 1679, et retrouvée par Chasles chez un libraire de Paris en 1845. On a dit avec raison que ce *Brouillon-project* est, pour l'époque, une merveille ; il contient explicitement ou en germe toute la géométrie moderne. On y trouve une foule d'idées entièrement nouvelles ; la notion des éléments géométriques situés à l'infini ; la théorie de l'involution (c'est le mot même qu'emploie Desargues), en partant des propriétés du point central ; celle des pôles et polaires ; la proposition connue sous le nom de théorème de Desargues ; l'étude complète des sections coniques, regardées comme figures perspectives du cercle, etc. Encore une fois, nous devons admirer comment Desargues sait, suivant ses propres paroles, concevoir dans l'universel, se contentant d'ailleurs d'indiquer les théorèmes principaux, fourmillières de grandes propositions qu'il laisse au lecteur le soin de déduire. Il méritait par là l'approbation de Descartes, pour qui une si belle méthode semblait prise de la métaphysique de la géométrie, cette science dont Archimède avait seul su se servir avant lui.

C'est encore à Desargues que l'on doit la théorie des figures homologiques ; et, d'après La Hire, il aurait construit le premier des roues d'engrenage à dents épicycloïdales, assurant le moindre frottement.

L'étude de la perspective, si importante pour les arts, était déjà fort développée du temps de Desargues ; parmi les nombreux auteurs qui ont écrit sur cette science, on peut rappeler Salomon de Caus, le père du Breuil, jésuite parisien, et le père Nicéron, ami et confrère de Mersenne dans l'ordre des Minimes, qui, dans sa *Perspective curieuse*, traite surtout des anamorphoses. La nouveauté des méthodes de Desargues, l'obscurité et la bizarrerie qui distinguent ses écrits (un de ses ouvrages perdus portait le titre énigmatique de *Leçons de ténèbres!*) lui valurent l'hostilité quasi unanime des contemporains versés dans l'art de la perspective ou de l'architecture ; de là, une vive polémique qui se prolongea pendant plusieurs années. C'est dans les libelles de ses détracteurs acharnés, de J. Curabelle, entre autres, que l'on a retrouvé une partie de l'œuvre de Desargues, qu'ils pensaient étouffer.

ROBerval Un autre nom, resté célèbre, celui de Roberval, revient à chaque instant quand on parle de Descartes, Fermat ou Pascal. Il s'appelait réellement Gilles Personier ; mais, né à Roberval, près de Beauvais, il se fit connaître sous le nom de Personne de Roberval, et plus brièvement

Roberval ; il mourut en 1675, membre de l'Académie des sciences depuis sa fondation, âgé de soixante-treize ans.

Après avoir assisté comme Desargues et peut-être Descartes au siège de la Rochelle, il se montra l'un des membres les plus assidus de l'académie Mersenne ; professeur de philosophie au collège de maître Gervais en 1631, il obtint peu après la chaire de mathématiques fondée par Ramus au Collège royal. Nous avons vu que cette chaire était obligatoirement mise au concours tous les trois ans. Roberval la conserva cependant jusqu'à sa mort, mais, afin de triompher périodiquement de ses concurrents, il tenait toujours en réserve quantité de belles choses qu'il avait découvertes. Ne publiant rien, ou à peu près, et se réjouissant *nimum juveniliter* des belles méthodes secrètes qui devaient lui assurer la supériorité en temps utile, il lui arriva plus d'une fois, si on l'en croit, de se laisser ravir l'honneur d'une découverte. Mais il avait aussi une difficulté naturelle pour écrire comme pour s'exprimer ; il se plaisait surtout à critiquer, souvent avec âpreté, quelquefois à tort. C'est ainsi qu'il a multiplié les objections contre la géométrie et même la philosophie de Descartes, qui n'en parle que dédaigneusement dans sa correspondance avec Mersenne. En revanche, il comptait Fermat, les deux Pascal, Mersenne, Carcavi, Gassendi, et aussi Huet, le futur évêque d'Avranches, comme amis très dévoués : cette constatation nous garantit que, malgré la rudesse de son caractère, il ne manquait pas de quelques vertus.

Les œuvres de Roberval n'ont été publiées intégralement qu'après sa mort. Il avait longtemps travaillé sur la cycloïde, cette courbe fameuse considérée pour la première fois par Galilée en Italie, par Mersenne en France, et qui, véritable Hélène des géomètres, a-t-on dit, fut l'occasion de tant de querelles ; il avait aussi une méthode particulière pour la construction des tangentes, dont Mersenne avait donné un aperçu dans ses *Cogitata physico-mathematica* de 1644. La même année, Torricelli, disciple de Galilée, publiait ses *Opera mathematica*, et Roberval y retrouvait un grand nombre de ses résultats : ce fut pour lui l'occasion d'adresser directement à Torricelli une lettre pleine de véhémence, dans laquelle il retrace ses travaux et revendique hautement la priorité de ses découvertes. Pascal, nous l'avons déjà dit, n'a pas hésité, bien plus tard, dans son histoire de la cycloïde, à accuser de plagiat Torricelli, mort depuis 1647 ; en réalité, la bonne foi de celui-ci ne saurait faire de doute.

En quelques mots, voici le sommaire de l'œuvre géométrique de Roberval. Dès 1628, Mersenne, plus habile à proposer de belles questions qu'à les résoudre, avait attiré son attention sur les problèmes de la cycloïde ; mais ils étaient alors au-dessus

de ses forces. En 1634, Roberval se rend maître de la *doctrine de l'infini*, voisine de la méthode des indivisibles de Cavalieri, publiée en 1635, mais d'une intelligence plus facile et moins sujette aux objections ; au lieu de considérer les lignes, par exemple, comme formées de points, il les compose d'éléments linéaires eux-mêmes. Grâce à sa méthode, il arrive alors à la quadrature de la cycloïde, à l'aide de considérations pleines d'ingéniosité, et personne ne peut lui contester la propriété de cette découverte. Puis il se tourne vers le problème des tangentes, dont il trouve d'abord une solution insuffisante, et bientôt une solution générale fondée sur la considération des mouvements composés ; en 1636, il la fait connaître, par l'intermédiaire de du Verdus, gentilhomme bordelais, qui recueillait ses leçons. Le principe de cette méthode à laquelle le nom de Roberval est resté attaché, est excellent et fécond ; mais il est curieux que ses applications les plus simples aient été présentées par son inventeur, et longtemps après encore, d'une façon vicieuse. Quant à l'application à la cycloïde, la correspondance de Descartes nous montre qu'elle est certainement postérieure à la date donnée par Roberval ; car dans ses lettres de 1638 à Mersenne, il s'égaie sans retenue des cinq ou six vaines tentatives qu'aurait faites Roberval avant d'arriver à une construction correcte du problème que lui-même et Fermat avaient déjà résolu.

D'autres questions sur des quadratures ou des cubatures, sur la théorie des équations, ont été traitées par Roberval ; en particulier il s'attribue encore la rectification de la cycloïde, mais il confesse qu'il l'avait gardée entièrement secrète ; c'est donc par sa faute que la priorité en revient à Wren, de même qu'il s'était laissé devancer par Cavalieri dans la question des indivisibles.

En résumé, nous devons conclure que Roberval était un excellent géomètre, plus laborieux sans doute que génial, mais à qui l'on doit réserver une place honorable parmi les précurseurs du calcul infinitésimal.

HUYGENS Christian Huygens de Zuylichem est né à la Haye en 1629 ; guidé par Schooten, il se familiarisa très jeune avec les idées de Descartes, que son père avait défendu contre les attaques de Voetius. Dès 1655, il voyage en France et en Angleterre, et entre en relations avec les savants les plus distingués de ces deux pays ; il est même reçu docteur en droit de l'Université d'Angers, où l'on admettait alors les protestants. Il appartient à la France depuis la fondation de l'Académie des sciences, dont il fut le plus illustre membre, jusqu'au moment où sa foi religieuse le ramena dans sa patrie, en 1681.

Les ouvrages de Huygens, tant sur la mécanique que sur la physique, peuvent

encore exciter l'admiration. Il s'est occupé aussi de diverses questions de géométrie, et nous devons retenir seulement ici qu'il est l'auteur de la théorie des développées et développantes, que l'on trouve, en même temps que la détermination du centre de courbure, dans son beau traité de l'*Horologium oscillatorium*, publié en 1673, avec dédicace à Louis XIV, et sur lequel nous aurons à revenir.

III

AUTRES SAVANTS DU DIX-SEPTIÈME SIÈCLE

Les grandes figures que nous venons d'esquisser ne doivent pas nous faire oublier ceux des contemporains qui, sans prétendre à tant de gloire, se sont montrés de bons ouvriers de la science. Ils sont nombreux, et tous n'ont pas laissé un souvenir durable : il serait injuste cependant de les laisser complètement dans l'ombre, car ils ont contribué à l'augmentation de la science, les uns par leurs menues découvertes, les autres, professeurs ou vulgarisateurs, par leur zèle à commenter, pour les mieux faire connaître, les découvertes des hommes éminents qu'ils reconnaissent pour leurs maîtres. Les derniers, plus modestes peut-être, ne méritent pas moins de reconnaissance, car ils ont exercé la plus heureuse influence sur la formation intellectuelle de la société française, où l'honnête homme doit faire preuve de lumières sur toutes les productions de l'esprit humain.

Claude-Gaspard Bachet de Méziriac (1587-1368), membre de l'Académie française en 1635, est connu par la bonne édition de *Diophante*, qu'il donna en 1621, avec de précieux commentaires, et surtout par ses *Problèmes plaisants et délectables qui se font par les nombres*; la première édition de ce livre apprécié est de 1612; la seconde, corrigée et augmentée, de 1624. Entre autres mérites, Bachet a fait faire de grands progrès à l'analyse indéterminée, et s'est occupé avec méthode des carrés magiques; c'est la lecture de son *Diophante* qui excita les recherches de Fermat.

Denis Henrion, professeur de mathématiques à Paris, a laissé beaucoup d'ouvrages d'enseignement, en particulier un *Traité des logarithmes* (1626), avec la première table de logarithmes imprimée en France : il faut reconnaître à cette occasion que, pendant bien longtemps, la découverte de Néper n'a excité aucun intérêt scientifique dans notre pays.

Cependant, Gabriel Mouton (1618-1694), théologien et vicaire de l'église Saint-Paul à Lyon, sa patrie, s'est occupé avec succès, dans son ouvrage *Observationes dia-*

metrorum Solis et Lunæ apparentium, de l'interpolation et de la construction des tables par la méthode des différences, déjà envisagée par H. Briggs ; il a construit lui-même des tables précieuses qui n'ont été utilisées que plus tard.

Nous avons déjà nommé deux amis de Descartes, Claude Hardy et Claude Mydorge. Le premier, mort en 1678, était magistrat au Châtelet, et possédait, dit-on, trente-six dialectes orientaux ; il a publié en 1625 la première édition des *Données* d'Euclide, avec traduction latine.

Mydorge (1585-1647), d'abord conseiller au Châtelet, puis trésorier de la généralité d'Amiens, était possédé de la passion des sciences ; il avait fait travailler à ses propres frais les verres aux formes compliquées nécessaires à la réalisation des instruments d'optique imaginés par Descartes. Il eut le mérite d'écrire, le premier en France, un traité des sections coniques, entreprenant d'aller au delà de ce qu'avaient fait les anciens à ce sujet, tout en simplifiant leurs démonstrations. Les deux premiers livres de son ouvrage parurent en 1631, les deux suivants en 1639 ; le titre, *Prodomi catoptricarum et dioptricarum, sive conicorum*, nous en montre l'inspiration. Quatre autres livres devaient suivre encore : faut-il croire que deux nobles anglais, lord Cavendish et lord Southampton, amis et hôtes de Mydorge, les aient emportés dans leur pays, où ils ont disparu ?

On trouve dans le traité de Mydorge beaucoup d'idées neuves et fécondes, entre autres les premiers germes de la transformation homographique. Un recueil de plus de mille problèmes résolus par Mydorge est resté manuscrit et mériterait d'être mieux connu. On a aussi de Mydorge un examen d'un livre de récréations mathématiques, dû au jésuite lorrain Leurechon (1624), dont l'intérêt dépasse celui du livre examiné.

Le *Cours mathématique* de Pierre Hérigone, publié d'abord en français, puis en latin (1634 et 1644), est une véritable encyclopédie où l'on trouve reproduits plusieurs ouvrages de l'antiquité. Hérigone est un précurseur de Leibniz pour sa tentative de réduire le langage mathématique à une symbolique universelle, devant le rendre intelligible à toutes les nations : aussi bien faut-il commencer par apprendre sa langue particulière si on veut le comprendre.

Le jésuite de Toulouse Antoine Lalouvière (1600-1664) n'est guère connu que par ses démêlés avec Pascal à propos du concours de la roulette ; son principal ouvrage, *Geometria promota in XII de cycloide libris*, vint trop tard (1660) pour lui assurer quelque mérite d'invention, d'autant que ses méthodes sont toujours embarrassées ; mais on doit lui savoir gré d'avoir publié en appendice l'essai de Fermat, avec qui il était lié, sur la rectification des courbes.

Bernard Frénicle de Bessy (1600-1675), conseiller à la cour des monnaies, et l'un

des premiers membres de l'Académie des sciences, fut un digne émule de Fermat, qui lui témoignait une grande estime. Il cultiva l'analyse indéterminée du second degré, et la théorie des carrés magiques ; il s'occupa surtout des triangles rectangles en nombres, c'est-à-dire dont les côtés sont mesurés par des nombres entiers. Le meilleur de son œuvre est probablement resté inédit : sa méthode paraît ingénieuse, mais comporte une grande part d'induction insuffisamment justifiée.

Antoine Arnauld, le grand Arnauld (1612-1694), tient une place importante dans l'histoire des méthodes scientifiques et de la philosophie mathématique ; mais c'est aussi un géomètre distingué, admiré de Leibniz, et qui a exercé une heureuse influence sur l'enseignement de la géométrie élémentaire. Ses thèses en Sorbonne (1641) sont aussi hardies que celle de Ramus. Il ose critiquer Euclide pour n'avoir pas su offrir au roi Ptolémée une route vers la géométrie plus courte que ses éléments ; il prend position avec Viète dans la question de l'angle de contingence ; il défend avec prudence le système de Copernic, disant que si nous croyons la terre immobile au centre du monde, c'est par autorité plutôt que par raison.

En 1667, il donne, sans nom d'auteur, de *Nouveaux éléments de géométrie*, réédités dans la suite plusieurs fois. En voici l'histoire : « M. Nicole disait que M. Pascal ayant montré un jour à M. Arnauld un travail qu'il avait fait sur les éléments d'Euclide, celui-ci n'en fut pas content parce que M. Pascal y laissait le défaut d'ordre qui se trouve dans Euclide. M. Pascal défia en riant le docteur de faire mieux. M. Arnauld accepta le défi, et, à son premier loisir, il traça l'ordre selon lequel il fallait étudier et enseigner la géométrie... Lorsque M. Pascal vit l'ouvrage, il condamna le sien au feu, et reconnut franchement que M. Arnauld avait trouvé le vrai ordre naturel de traiter cette matière, et il en rendit gloire au docteur de Sorbonne. »

Sans aller jusqu'à appeler Arnauld l'Euclide du dix-septième siècle, on doit reconnaître de grandes qualités dans sa géométrie, trop vite oubliée ; dans un appendice à cet ouvrage, on trouve encore une méthode intéressante pour la construction des carrés magiques ; faut-il la rapprocher de celle que promettait Pascal dans son adresse de 1654 à l'Académie parisienne ?

Lorsqu'en 1696 Nicolas de Malézieu, membre de l'Académie française et de l'Académie des sciences, ancien précepteur du duc du Maine, puis organisateur des fêtes de la duchesse, fut chargé de l'éducation mathématique du duc de Bourgogne, il choisit les éléments de géométrie d'Arnauld pour en faire le fond de ses leçons. En 1715, il publia lui-même les *Éléments de géométrie de Mgr le duc de Bourgogne*, où l'on remarque un essai de démonstration du postulatum d'Euclide ; on a dit qu'une partie de la rédaction était due à son royal élève.

Philippe de La Hire (1640-1718) entra à l'Académie des sciences comme astronome en 1678 ; savant universel, on eût pu, dit Fontenelle, avoir en lui seul une Académie entière des sciences. Comme son père, peintre ordinaire du roi, il excellait dans les beaux-arts, et l'étude de la perspective le mena sans doute à la géométrie ; il resta toute sa vie fidèle à la méthode des anciens, sourdement hostile au calcul de l'infini, qu'il lui fallait bien cependant employer quelquefois, mais en l'affublant du masque grec.

Il a publié plusieurs ouvrages sur les sections coniques, dans lesquels il se montre le digne continuateur de Desargues et de Pascal, et qui lui ont valu d'être mis par Chasles au rang des fondateurs de la géométrie moderne. Il s'est beaucoup occupé aussi des épicycloïdes en général, déterminant leurs tangentes, leurs superficies et leurs longueurs par la géométrie ordinaire ; bien que Leibniz ait revendiqué pour Rømer l'invention des engrenages épicycloïdaux, c'est à La Hire qu'elle appartient, et lui-même la fait remonter à Desargues, comme nous l'avons vu précédemment.

Jacques Ozanam (1640-1717), entré à l'Académie des sciences comme élève géomètre à l'âge de soixante-sept ans, a laissé une œuvre considérable, de valeur très inégale. Citons seulement son *Dictionnaire des mathématiques*, un des premiers ouvrages de ce genre, et les *Récréations mathématiques et physiques* (1694), qui ont fait sa réputation.

Antoine Parent (1666-1716) a donné le premier les équations de plusieurs surfaces rapportées à trois axes de coordonnées rectangulaires, et a cherché celles de leurs plans tangents.

Laurent Pothenot, professeur au Collège royal, a laissé son nom au problème de la carte, dont il donna la solution en 1692 ; à la vérité, il avait été prévenu par Snellius dans son *Eratosthenes batavus* de 1617.

Michel Rolle (1652-1719), né à Ambert, vint à Paris âgé de vingt-trois ans, comme professeur d'écriture et de calcul ; une recherche d'arithmétique le fit distinguer par Colbert, qui, dit Fontenelle, avait des espions pour découvrir le mérite caché ou naissant ; il se dévoua alors entièrement à l'algèbre, et entra à l'Académie en 1685. Son ouvrage principal est un *Traité d'algèbre* (1690), où l'on trouve de bonnes parties sur l'analyse de *Diophante*, et surtout une façon nouvelle de résoudre les équations numériques, fondée sur la *méthode des cascades*, c'est-à-dire sur le théorème si simple qui assure au nom de Rolle une notoriété égale à celle des plus illustres. Rolle avait aussi mauvais caractère que Roberval : « Quand il ouvrait une matière à l'Académie, il semblait qu'on dût se préparer à combattre. » L'abbé Jean Galloys, dont nous avons déjà rencontré le nom, ne goûtait point la nouvelle géométrie,

c'est-à-dire le calcul de l'infini ; pour conduire la guerre contre cette intruse, capable seulement d'induire en erreur, il s'unit à Rolle, qui fournissait les raisonnements ; La Hire et le père Gouye (seul jésuite qui ait été de l'Académie des sciences, ne peut s'empêcher de remarquer Condorcet) les soutenaient discrètement ; mais leurs plus rudes adversaires étaient Varignon et Saurin. Plus tard, « quand la paix des infiniment petits fut faite, ou le silence ordonné », Rolle s'attaqua à Descartes ; il avait peut-être raison sur des points de moindre importance, mais il avait décidément l'esprit court.

Joseph Sauveur (1653-1716), professeur au Collège royal, quand il osa surmonter la difficulté qu'il éprouvait à s'exprimer, s'est occupé avec le plus grand succès pour lui, sinon pour la science, du calcul des probabilités ; plus heureux que les joueurs, il dut sa fortune à la bassette ; ayant calculé pour le marquis de Dangeau l'avantage du banquier contre les pontes, il devint le mathématicien à la mode, adopté par la Cour.

Thomas Fantet de Lagny (1660-1734) fut professeur d'hydrographie à Rochefort, puis, par la faveur du régent, sous-directeur de la Banque générale, dont le désastre laissa son honneur intact. Il aimait l'arithmétique et l'algèbre, et, par-dessus tout, le calcul. Il s'est occupé avec succès de la théorie des différences et des progressions arithmétiques d'ordre supérieur, pour l'appliquer à la résolution des équations ; il a donné des méthodes ingénieuses d'approximation et d'abréviation pour l'extraction des racines ; il s'est rencontré avec Leibniz sur l'arithmétique binaire ; il a retrouvé le développement donné par James Gregory dès 1671 pour déterminer l'arc par sa tangente, et, comme application, il a pu calculer le rapport de la circonférence au diamètre avec 127 décimales exactes (sauf la 113^e) ; il savait d'ailleurs qu'en matière de grands calculs, il ne suffit pas que la méthode soit infaillible de droit, mais que, par l'emploi de deux ou plusieurs méthodes entièrement différentes, on doit donner au calcul une infaillibilité de fait.

IV

L'ANALYSE Fermat et Pascal ont fixé les principes fondamentaux du calcul infinitésimal ; mais ceux-ci seraient restés stériles si leur développement n'avait pu s'appuyer sur la nouvelle analyse de Descartes. On doit donc à ces hommes illustres, et c'est la raison de leur grandeur éminente, non seulement les fondations solides d'un édifice magnifique, mais encore l'art d'en poursuivre la construction.

Leurs continuateurs immédiats, à qui revient l'honneur d'avoir fait sortir l'édifice de terre et d'en avoir élevé les premiers portiques, ne sont plus des géomètres français : l'un, Newton, est la gloire de l'Angleterre ; l'autre, Leibniz, est celle de l'Allemagne. Ces deux grands hommes, d'un génie universel, se sont ardemment disputé l'invention du calcul infinitésimal ; nous n'avons pas à raconter ici l'histoire affligeante de cette querelle trop fameuse ; en réalité, ils paraissent avoir tous deux des droits égaux.

Isaac Newton (1642-1727) était en possession de sa *méthode des fluxions* dès 1665, mais ne la fit connaître que beaucoup plus tard, sauf peut-être à quelques initiés ; sans doute y fut-il amené par les leçons de son maître Barrow, qui avait développé des méthodes analogues à celles de Fermat, sans qu'on puisse affirmer qu'il ne les avait pas retrouvées lui-même : il est à peu près impossible de se prononcer sur de tels points, comme nous l'avons déjà fait voir. On sait le principe de la méthode de Newton : une quantité variable peut être représentée par un segment de droite dont l'extrémité se déplace d'une façon continue, et devient alors une *fluente* ; la vitesse du mouvement de cette extrémité est la *fluxion* de cette fluente.

Déterminer la relation entre les fluxions, connaissant celle qui existe entre les fluentes, c'est le calcul différentiel ; le problème inverse est le calcul intégral, au sens étroit, ou calcul des quadratures ; plus généralement, déterminer la relation entre les fluentes, connaissant une relation entre ces quantités elles-mêmes et leurs fluxions, c'est le calcul intégral général, l'intégration des équations différentielles, ou, comme on disait alors, la méthode inverse des tangentes.

On a reproché longtemps à Newton d'avoir introduit l'idée superflue de mouvement, et par suite de temps, dans la géométrie ; il y a plus, la notion même de vitesse, qui, suivant l'expression de Lagrange, paraît plus claire parce que tout le monde a ou croit avoir une idée de la vitesse, ne peut être précisée sans avoir recours à la notion de limite, inévitable quoi qu'on fasse. Cette objection n'a pas échappé à Newton, car il qualifie lui-même son procédé de méthode des dernières raisons des quantités évanouissantes : ainsi présentée, sa conception du calcul différentiel ne diffère pas de la nôtre.

Godefroy-Guillaume Leibniz (1646-1716) était venu une première fois à Paris en 1672, et s'y était lié avec Huygens et quelques autres des savants les plus distingués ; il avait eu aussi l'occasion de lire les écrits de Descartes et de Pascal, imprimés ou non : son goût naturel pour les mathématiques en reçut une vive impulsion. Il raconte lui-même que, dans l'étude d'une figure du *Traité des sinus du quart de cercle* de Pascal, il trouva une soudaine lumière que l'auteur n'avait

point vue : c'est donc Pascal son inspirateur, et non Barrow, comme l'auraient voulu les défenseurs trop zélés de l'origine purement anglaise de l'analyse infinitésimale.

Dès 1675, Leibniz possède les caractéristiques fondamentales, toujours en usage, de la différentiation et de l'intégration, dont l'importance est essentielle, parce qu'elles traduisent des idées, celles de différence et de somme : les conceptions mathématiques de Leibniz sont d'ailleurs inséparables de ses conceptions philosophiques.

C'est en 1684 que Leibniz expose pour la première fois, en quelques pages des *Acta eruditorum* de Leipzig, les principes de sa méthode, « fondée, dit Lagrange, sur la considération des quantités infiniment petites des différents ordres, et sur la supposition qu'on peut traiter et regarder comme égales les quantités qui ne diffèrent entre elles que par des quantités infiniment petites à leur égard ». En d'autres termes, une différentielle est une quantité infiniment petite actuelle, au sens philosophique du mot. On comprend dès lors aisément que cette conception, malgré son succès, ait donné lieu à des controverses prolongées, que l'on peut toujours reprendre, car le problème de l'infini est de ceux qui semblent s'imposer à l'intelligence humaine, mais pour la dépasser toujours. Voici comment s'exprime encore Lagrange à ce sujet : « ...la véritable métaphysique de ce calcul consiste en ce que l'erreur résultant de cette fausse supposition est redressée ou compensée par celle qui naît des procédés mêmes du calcul » ; et Carnot, dans ses *Réflexions sur la métaphysique du calcul infinitésimal* (1797), soutient la même opinion, mais conserve l'idée de Leibniz, tandis que Lagrange croit s'en affranchir en partant de la notion encore moins justifiée de développement *a priori* des fonctions en série de Taylor, dans sa *Théorie des fonctions analytiques contenant les principes du calcul différentiel dégagés de toute considération d'infiniment petits, d'évanouissans, de limites et de fluxions, et réduits à l'analyse algébrique des quantités finies* (1797).

Euler et d'Alembert étaient dans le vrai en faisant voir que le calcul différentiel ne doit comporter que des limites de rapports de quantités infiniment petites, comme nous les entendons de nos jours, c'est-à-dire de quantités *variables* ayant pour limite zéro : c'était harmoniser les idées de Leibniz et celles de Newton. Mais la notion de limite supprime-t-elle véritablement toute difficulté dans la conception de l'infini mathématique, infiniment grand ou infiniment petit ? ou plutôt ne déplace-t-elle pas simplement cette difficulté, puisqu'elle-même comporte l'idée de l'infini ? Il ne nous appartient pas d'insister davantage, ayant seulement voulu montrer pourquoi, dès leur naissance, les nouveaux calculs devaient rencontrer des contradicteurs parmi les géomètres habitués à des principes d'une évidence moins incertaine et manquant de foi pour aller plus avant. Nous avons déjà nommé les principaux de ces contra-

dicteurs en France, et les considérations précédentes peuvent nous inspirer quelque indulgence à leur égard : il est temps de leur opposer les savants mieux inspirés qui ont su comprendre la puissance nouvelle que les méthodes infinitésimales allaient apporter à la science.

DE L'HOPITAL Malgré la brièveté et le mystère des premières communications de Leibniz sur la nouvelle analyse, quelques savants, en bien petit nombre, cherchèrent à pénétrer sa méthode et à la perfectionner : les premiers furent les deux frères Jacques et Jean Bernoulli, originaires de Bâle, souvent émules, quelquefois rivaux sans ménagements. Leur exemple fut suivi en France par Guillaume-François-Antoine, marquis de L'Hôpital (1661-1704), qui publia dès 1696 le premier traité de calcul différentiel sous le titre d'*Analyse des infiniment petits pour l'intelligence des lignes courbes*.

Capitaine de cavalerie, L'Hôpital avait quitté le service en raison de la faiblesse de sa vue, pour se consacrer tout entier aux mathématiques, qu'il aimait depuis son enfance. Ami de Malebranche, de Leibniz, d'Huygens, il accueillit aussi Jean Bernoulli à Paris en 1692. On a prétendu longtemps, sur la foi de ce dernier, qu'il lui devait toute sa science des nouveaux calculs, et qu'il l'avait dépouillé du fruit de ses travaux ; mais ce n'est qu'une légende : Jean Bernoulli exagérait souvent son mérite, même aux dépens de la vérité.

L'Hôpital a profité légitimement des travaux publiés avant les siens, et le dit ouvertement dans sa préface : « Je me suis servi sans façon de leurs découvertes et de celles de M. Leibniz », mais c'est par son propre effort qu'il s'était rendu maître des théories nouvelles. Ce qui le distingue encore de ses émules, ce qui fait valoir la noblesse de son caractère, c'est qu'aussitôt il résolut de communiquer sans réserve les trésors cachés d'une science qui restait, suivant l'expression de Fontenelle, mystérieuse et comme cabalistique, renfermée entre cinq ou six personnes qui se lançaient par la voie des journaux des défis retentissants sous forme de problèmes, mais prenaient bien soin de cacher la méthode qui avait pu les conduire à la solution. Quelques-uns de ces problèmes sont restés célèbres : la chaînette, la brachistochrone, les tautochrones, les isochrones, les isopérimètres, le solide de moindre résistance, la courbe élastique, les trajectoires orthogonales, et tant d'autres. L'Hôpital les résolvait sans difficulté ; c'était à L'Hôpital aussi que l'illustre Huygens, vieilli, s'était adressé pour s'instruire du calcul différentiel, dont il avait su prévoir l'étendue et la fécondité.

L'*Analyse des infiniment petits*, souvent réimprimée et commentée, fut reçue

avec un applaudissement universel ; un vaudeville et un air des infiniment petits consacrèrent le succès. C'est dans cet ouvrage qu'est énoncée et démontrée pour la première fois la règle dite de L'Hôpital, relative aux formes indéterminées : huit ans plus tard, après la mort de L'Hôpital, Jean Bernoulli en revendiqua la paternité ; Varignon et Saurin lui répondirent comme il convenait. On peut s'étonner que L'Hôpital ait laissé de côté le calcul intégral ; c'était pure délicatesse, car il ne voulait pas prévenir Leibniz qui annonçait depuis longtemps un grand ouvrage, jamais paru, sur la science de l'infini.

Quand il mourut prématurément en 1704, L'Hôpital avait achevé un *Traité analytique des sections coniques*, qui fut publié en 1707. C'est un ouvrage excellent, quoique sans idées essentiellement neuves, et son succès ne fut pas moindre que celui de l'*Analyse des infiniment petits*.

D^E MONTMORT Pierre Rémond de Montmort (1678-1719) avait pris très jeune Malebranche pour guide ; il fut pendant quelques années chanoine de Notre-Dame de Paris, mais, non engagé dans les ordres, il abandonna cette dignité en 1706 pour se marier. En 1708, il donna la première édition de son *Essai d'analyse sur les jeux de hasard*. « C'étaient le pharaon, la bassette, le lansquenet, l'hombre, le trictrac, qui paraissaient sur la scène, assujettis au calcul, et domptés par l'algèbre. » En réalité, c'était le premier ouvrage sérieux consacré à la théorie des probabilités. La seconde édition de 1713 est de beaucoup supérieure à la première ; elle est enrichie de la correspondance de l'auteur avec Jacques Bernoulli et son neveu Nicolas, qui venait de faire paraître l'*Ars conjectandi*, ouvrage posthume de Jacques. De Montmort avait accueilli Nicolas, de passage à Paris, et l'avait emmené à sa campagne, « où ils passèrent trois mois dans un combat continuel de problèmes dignes des plus grands géomètres ». En 1711, avait paru aussi le *De mensura sortis* ou *Doctrine of Chances*, d'Abraham de Moivre, un Français protestant réfugié en Angleterre ; l'auteur y louait de Montmort, mais critiquait sa méthode : ce fut l'origine d'une querelle passagère.

De Montmort était d'ailleurs lié avec tous les savants de son temps, et on lui soumettait les pièces du grand procès entre Leibniz et Newton. En 1715, il fit un troisième voyage en Angleterre pour observer une éclipse totale de soleil, et y fut reçu comme membre de la Société royale ; en 1717, il donnait aux *Philosophical transactions* un mémoire sur les suites infinies. Il fut emporté par la petite vérole en 1719 ; il travaillait alors à une histoire de la géométrie.

Un de ses élèves et collaborateurs, François Nicole (1683-1758), s'est occupé

plus clairement que B. Taylor du calcul des différences finies, de quelques problèmes relatifs aux probabilités, et aussi des lignes du troisième ordre, déjà étudiées par Newton, Stirling et Maclaurin.

AUTRES MATHÉMATICIENS AU COMMENCEMENT DU DIX-HUITIÈME SIÈCLE Pierre Varignon (1654-1722), professeur au collège Mazarin et au Collège de France, a défendu, nous l'avons déjà dit, la géométrie nouvelle contre Rolle. Connu surtout par ses travaux de mécanique, il a le grand mérite d'avoir exprimé des idées nettes sur la légitimité de l'usage des séries ; et dans ses *Éléments de mathématiques* (publiés seulement en 1731), il fait preuve de conceptions originales et de vues philosophiques intéressantes.

Un de ses élèves, Louis Carré (1663-1711), d'abord secrétaire de Malebranche, a suppléé L'Hôpital, bien imparfaitement, en donnant en 1710 un traité de calcul intégral sous le nom de *Méthode pour la mesure des surfaces*. Un ouvrage resté longtemps célèbre est l'*Analyse démontrée* (1708) du père Charles Reyneau, de l'Oratoire, ami de Malebranche ; on y trouve réuni l'essentiel des découvertes de Descartes, Leibniz, Newton, Rolle, etc.

Comme Varignon, Joseph Saurin (1655-1737), pasteur en Dauphiné, puis en Suisse et en Hollande, converti par Bossuet en 1690, victime de cruelles mésaventures, était un ami de L'Hôpital, et un adversaire déterminé de Rolle dans la querelle des infiniment petits ; mais, d'autre part, fidèle aux tourbillons, il attaquait avec la même ardeur l'attraction de Newton. On lui doit l'éclaircissement des difficultés que présentait alors l'étude des points multiples des courbes algébriques.

C'est dans le même ordre d'idées que travaille l'abbé Christophe-Bernard de Bragelongne (1688-1744), Doyen et Comte de l'église royale de Saint-Julien de Brioude ; il s'occupe aussi des branches infinies, des quadratures, et essaye une classification des courbes du quatrième degré, comme avait fait Newton pour celles du troisième.

Pierre-Louis Moreau de Maupertuis (1698-1759), dont nous avons déjà eu l'occasion de parler, et que nous rencontrerons encore, était le savant le plus connu des gens du monde depuis le succès de son expédition polaire. Ancien officier de mousquetaires, il mêlait beaucoup de vanité à son amour pour les sciences. Le plus clair de ses titres est d'avoir défendu le premier, dès 1732, les théories de Newton sur l'attraction ; il soutenait même que l'attraction est une qualité essentielle inhérente à la matière, allant beaucoup plus loin que Newton, qui ne l'avait présentée que comme un moyen d'expliquer les phénomènes.

Plus encore que Maupertuis, Bernard Le Bouyer de Fontenelle (1657-1757) n'intéresse qu'indirectement l'histoire des mathématiques ; on ne peut cependant s'empêcher d'en dire quelques mots, si l'on ne veut pas séparer trop nettement cette histoire de celle du mouvement des esprits. Secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences depuis 1697 jusqu'en 1740, ce n'est qu'à l'âge de quatre-vingt-trois ans que Fontenelle put obtenir du cardinal de Fleury, son émule dans l'art de vieillir, la permission de résigner sa lourde fonction, et encore en se faisant traiter de paresseux et de libertin, pour qui l'indulgence est nécessaire. Les *Entretiens sur la pluralité des mondes* l'avaient fait entrer à l'Académie comme géomètre en 1697, et, presque immédiatement, il succéda à Jean-Baptiste Duhamel, secrétaire depuis la fondation. Il s'acquitta de ces fonctions avec un grand zèle ; la composition des éloges qu'il consacrait à ses confrères disparus est d'un art incomparable ; la façon dont il écrivait annuellement l'histoire de l'Académie est celle même qui convenait à son temps, avide de science agréable enveloppée de philosophie brillante et facile, et peu soucieux du péril auquel on s'expose quand on croit comprendre.

Fontenelle parlait bien de la science mais n'était pas un savant, quoiqu'il ait écrit en 1727 un gros volume sur la *Géométrie de l'infini*, où il se montre plus leibnizien que Leibniz. On dit qu'il présenta son œuvre au régent en ces termes : « Monseigneur, voilà un livre que huit hommes seulement en Europe sont en état de comprendre, et l'auteur n'est pas de ces huit-là » ; il définissait fort justement ses capacités scientifiques.

Fontenelle fut cartésien jusqu'à l'impénitence finale : il avait quatre-vingt-quinze ans quand il publia en 1752 sa *Théorie des tourbillons*. Aussi son éloge de Newton fut-il mal accueilli à Londres : il avait osé comparer le grand homme et Descartes.



FONTENELLE

(D'après un tableau de Voiriot, gravé par Langlois).

V

CLAIRAUT Si Euler est le plus grand mathématicien du milieu du dix-huitième siècle, Clairaut et d'Alembert lui cèdent de peu, et avec eux la France commence à reprendre le rang qu'elle avait perdu depuis l'époque de Descartes, Fermat et Pascal. Comme presque tous les savants contemporains, ils ont été attirés de préférence par les problèmes que soulevaient les théories de Newton, et par suite nous ne pourrions voir ici que l'une des faces de leur activité, souvent la moins importante.

Alexis-Claude Clairaut (1713-1765) était le second des vingt et un enfants d'un maître de mathématiques de Paris, et l'on a pu dire qu'il suça la géométrie avec le lait. A l'âge de douze ans et demi, il lut à l'Académie son premier Mémoire sur quelques courbes du quatrième degré, étudiées avec les moyens du calcul infinitésimal. A peine âgé de seize ans, il présenta un ouvrage considérable, publié en 1731 sous le titre de *Recherches sur les courbes à double courbure*. Descartes, le premier, en avait parlé quelque peu, mais c'est Henri Pitot (1695-1771), bien connu comme ingénieur hydraulicien, qui leur avait donné leur nom, peut-être parce qu'il s'agit de *courbes* tracées sur des surfaces *courbes*; pour Clairaut, il semble plutôt que la double courbure tienne à la considération des deux projections nécessaires pour définir ces courbes.

L'ouvrage de Clairaut justifie pleinement l'éloge qu'en faisait Privat de Molières dans son rapport, disant que les plus habiles des mathématiciens des temps passés et présents pourraient tenir à honneur de l'avoir composé. Aussi Clairaut fut-il admis à l'Académie dès l'âge de dix-huit ans, par exception au règlement, qui exigeait au moins deux ans de plus.

Un peu plus tard, il donna la solution de quelques questions *de maximis et minimis* qui sont des problèmes isopérimétriques, et étudia les lignes géodésiques des surfaces de révolution, en particulier de l'ellipsoïde peu aplati, à propos de la figure de la terre.

Dans ses *Recherches générales sur le calcul intégral* (1739), dans son *Mémoire sur l'intégration ou la construction des équations différentielles du premier ordre* (1740), Clairaut se rencontre avec Euler, sans lui avoir rien emprunté, pour l'intégration des différentielles totales et l'emploi du facteur intégrant; dans un

travail antérieur de 1734, il avait montré l'existence d'une solution singulière, en s'occupant de l'équation qui est restée connue sous son nom.

Clairaut ne dédaigna pas de composer pour les commençants des *Éléments de géométrie* (1741) et des *Éléments d'algèbre* (1746), dont le succès fut très grand et prolongé : abandonnant l'appareil ordinaire des démonstrations géométriques, il fait surtout appel à l'intuition, et par la façon dont il excite la curiosité naturelle du lecteur, il l'amène à découvrir de lui-même et à explorer tout le champ de la science élémentaire. C'est l'achèvement de la défaite d'Euclide en France, poursuivie depuis Ramus ; c'est aussi le commencement de l'étude philosophique des principes, que l'Encyclopédie allait mettre à l'ordre du jour. Toutefois, il ne faudrait pas accepter sans réserves des règles telles que celle-ci : « Tout raisonnement qui tombe sur ce que le bon sens seul décide d'avance est aujourd'hui en pure perte et n'est propre qu'à obscurcir la vérité » : le bon sens doit être doublé de finesse.

Parmi les élèves de Clairaut, il faut nommer la célèbre marquise du Châtelet, qui contribua avec Voltaire à la déroute du cartésianisme, en faisant connaître les théories de Newton ; sa traduction des *Principes* fut publiée en 1756, après sa mort, par les soins de Clairaut.

Clairaut mourut jeune : Bossut rapporte qu'un goût trop vif pour les plaisirs du monde et la société des femmes lui fit perdre le repos, la santé et enfin la vie.

D'ALEMBERT Jean Le Rond d'Alembert joue un trop grand rôle dans l'histoire littéraire et philosophique du dix-huitième siècle pour qu'il soit utile de rappeler ici sa biographie. Ses maîtres du Collège des Quatre-Nations avaient espéré qu'il serait un nouveau Pascal, géomètre et janséniste : il ne fut que géomètre et ennemi des jésuites. Un mémoire où il relevait quelques incorrections dans l'*Analyse démontrée* du père Reyneau lui ouvrit les portes de l'Académie en 1741. Deux ans après, il publiait son *Traité de dynamique*, dont nous parlerons plus loin. Mais, comme l'explique Condorcet, « dans la théorie des fluides comme dans celle du mouvement des corps susceptibles de changer de forme, le principe de d'Alembert, lorsqu'on l'employait seul, conduisait à des équations qui échappaient aux méthodes connues, et cette première découverte semblait rendre nécessaire celle d'un nouveau calcul ; dans un ouvrage sur la théorie générale des vents, couronné par l'Académie de Berlin en 1746, d'Alembert donna les premiers essais du calcul des différences partielles ; l'année suivante, il l'appliqua au problème des cordes vibrantes ».

En 1746, d'Alembert fait une tentative pour démontrer le théorème fondamental

de l'algèbre, qui a gardé son nom. C'était une question à l'ordre du jour, parce que l'intégration des fonctions rationnelles exigeait la décomposition du dénominateur en facteurs réels du premier ou du second degré. La démonstration de d'Alembert ne pouvait être rigoureuse ; elle est d'ailleurs fort embarrassée de considérations bizarres : la clarté n'était pas la préoccupation dominante de l'auteur, quoiqu'il en exigeât beaucoup chez les autres. En réalité, toutes les démonstrations semblables supposent *a priori* l'existence des racines d'une équation, réelles ou *impossibles*, et l'on cherche seulement à faire voir que ces dernières peuvent se ramener à la forme imaginaire, comme d'ailleurs toute fonction de quantités imaginaires.

Les recherches de d'Alembert sur les mathématiques pures sont consacrées principalement à l'étude des quadratures de fonctions algébriques et à l'intégration des équations différentielles ordinaires ou aux dérivées partielles ; elles sont la source de grands progrès pour la science, mais, pour expliquer le rôle et l'influence de d'Alembert, il faut nous tourner d'un autre côté. Des libraires de Paris avaient projeté une édition française d'un ouvrage anglais, la *Cyclopædia* d'Ephraïm Chambers, publiée en 1728, et en avaient chargé l'abbé de Gua, qui s'était associé de nombreux savants, entre autres d'Alembert ; comme de Gua ne voulait pas se contenter d'une traduction, et concevait une rédaction entièrement nouvelle, il dut abandonner l'affaire, mais son plan général fut repris par Diderot et d'Alembert, et devint celui de l'*Encyclopédie*, dont la partie mathématique et philosophique est l'œuvre de d'Alembert presque seul ; c'est à lui aussi qu'est dû le discours préliminaire, qui lui valut plus de célébrité que ses travaux de géométrie. C'est dans ses articles de l'*Encyclopédie* que d'Alembert expose ses vues souvent ingénieuses, mais quelquefois paradoxales, sur bien des questions de mathématiques, par exemple sur les nombres négatifs, sur l'infini, sur la géométrie élémentaire, qu'il voudrait voir enseignée par des géomètres de premier rang, etc. Dans la question des logarithmes des nombres négatifs ou imaginaires, qui avait fait l'objet d'une vive controverse entre Leibniz et Jean Bernoulli, et qu'Euler venait d'élucider définitivement en donnant raison au premier, d'Alembert se range du côté de Bernoulli, et soutient les pires absurdités. S'il émet des idées justes sur la convergence des séries et leur emploi, le cas irréductible de l'équation du troisième degré ne provient pour lui que d'une mauvaise façon de chercher la solution ; un paradoxe sur la rectification des courbes qui présentent un rebroussement lui fait dire : « Voilà donc encore le calcul en défaut ! » Sur le calcul des probabilités, il déraisonne complètement, suivant l'expression de J. Bertrand, soutenant par exemple qu'au jeu de croix ou pile, la probabilité d'amener croix au moins une fois en deux coups est égale à deux

tiers et non à trois quarts, et qualifiant de scandale des mathématiques la solution correcte donnée par Daniel Bernoulli au fameux problème de Saint-Pétersbourg, qui exige un enjeu infini. Quoi qu'en dise Condorcet, ce n'est pas à d'Alembert que le calcul des probabilités devra des bases plus certaines.

Le problème des cordes vibrantes, étudié pour la première fois par Brook Taylor en 1715, avait amené d'Alembert à l'intégration d'une équation aux dérivées partielles à l'aide de fonctions arbitraires ; la nature de ces fonctions fut l'objet d'une vive dispute avec Euler : pour d'Alembert, elles devaient être analytiques, représentables par une équation ; pour Euler, elles pouvaient être quelconques, purement graphiques, même discontinues. La solution de Daniel Bernoulli, exprimée par une série trigonométrique, ne pouvait que compliquer la difficulté ; comment une telle série aurait-elle pu représenter un polynôme, par exemple ? La controverse se prolongea pendant bien des années. Laplace, Lagrange, Arbogast, le géomètre Charles et d'autres émirent successivement leurs idées sur la façon de concevoir les fonctions arbitraires qui figurent dans la solution des équations aux dérivées partielles, et les appuyèrent sur des considérations empruntées à la physique ou même à la métaphysique ; aucun n'avait ni complètement tort, ni complètement raison : si Fourier a commencé d'éclaircir le problème de la représentation des fonctions quelconques sous forme de série trigonométrique, l'intelligence complète de la notion même de fonction est une conquête beaucoup plus récente.

FONTAINE Alexis Fontaine des Bertins (1705-1771) eut de son temps une grande réputation ; ne parlait-on pas de ses méthodes admirables jusque dans les cafés, pour l'opposer à Clairaut et d'Alembert ? Il n'est nullement nécessaire de lire entre les lignes de son éloge par Condorcet pour être convaincu que c'était surtout un original, d'un commerce parfaitement désagréable ; lui-même se vantait d'observer la vanité des hommes pour la blesser dans l'occasion.

Fontaine s'est occupé des équations algébriques et des équations différentielles, retrouvant des propositions énoncées depuis longtemps, comme le théorème d'Euler sur les fonctions homogènes, de bonne foi sans doute, car « jamais géomètre n'avait lu moins de livres de géométrie ». Il n'hésitait pas à s'engager dans des méthodes inextricables, laissant planer sur leur nature et leur étendue une obscurité affectée qui servait surtout à en cacher les limites : c'est ainsi qu'il dénombrait plus de six cents cas pour l'équation du quatrième degré. Si on lui doit quelques remarques importantes sur la théorie des équations différentielles du premier ordre, son peu d'empressement à se faire imprimer ne lui assure pas le bénéfice de leur décou-

verte ; de même, seulement en 1764, il nous apprend qu'il était en possession dès 1739 du principe général de mécanique connu sous le nom du principe de d'Alembert.

D^{E GUA} L'abbé Jean-Paul de Gua de Malves est né à Carcassonne vers 1712, mort à Paris en 1786 ; n'oubliant jamais que son père avait été ruiné par le désastre du système de Law, il passa la plus grande partie de sa vie à faire des projets pour s'enrichir, et n'en fut que plus malheureux. Promoteur de nombreuses entreprises qu'il devait toujours abandonner avant de les mener à bonne fin, c'est lui qui conçut le plan de l'*Encyclopédie*, comme nous l'avons déjà dit ; il voulut aussi fonder un journal scientifique, mais sa volonté d'y comprendre la philosophie abstraite et l'économie politique l'empêcha de réussir ; il cherchait à ramasser l'or de l'Ariège, étudiait des projets d'emprunt par loteries, et pour vivre, traduisait les dialogues de Berkeley.

Les principaux travaux mathématiques de l'abbé de Gua sont à la gloire de Descartes ; en 1740, il publia l'*Usage de l'analyse de Descartes pour découvrir, sans le secours du calcul différentiel, les propriétés ou affections principales des lignes géométriques de tous les ordres*. c'est un ouvrage important pour l'histoire de la géométrie analytique, et certainement Gabriel Cramer s'en est inspiré en écrivant la célèbre *Introduction à l'analyse des courbes algébriques* (Genève, 1750) ; on y trouve en particulier une excellente étude des points singuliers à distance finie ou infinie, à l'aide du triangle analytique substitué au parallélogramme de Newton ; et la considération des cubiques comme ombres des cinq paraboles divergentes conduit l'auteur au théorème relatif aux points d'inflexion en ligne droite. Dans les mémoires de l'Académie pour 1741, de Gua donne la première démonstration de la règle des signes de Descartes, si longtemps mise en doute, avec un complément intéressant ; on trouve aussi dans le même recueil des recherches sur les moyens de reconnaître la nature des racines des équations, inspirées par des considérations géométriques fort simples, mais dont on ne s'était pas encore avisé.

CONDORCET. INFLUENCE DES IDÉES PHILOSOPHIQUES

Marie-Jean-Antoine Caritat, marquis de Condorcet (1743-1794), secrétaire perpétuel adjoint (1773), puis titulaire de l'Académie des sciences, avant d'être pris par la politique et lancé dans le mouvement révolutionnaire, était mathématicien, médiocre d'ailleurs. Ses recherches sur le calcul intégral, son mémoire sur le problème des trois corps, lui valurent une grande réputation, on ne sait pourquoi, car



CONDORCET
(D'après un dessin de J.-B. Lemort, gravé
par A. de Saint-Aubin).

son style est diffus, ses idées sont imprécises, obscures, souvent bizarres, quelquefois inexactes. Plus tard, son ardeur politique l'entraîne, comme beaucoup de ses contemporains, vers l'étude des questions sociales ; les mathématiques ne sont plus alors qu'un moyen : leur application aux sciences politiques, morales, économiques devient la question du jour, et, en s'appuyant sur elles, on veut donner aux idées philosophiques régnantes une certitude nouvelle. Le calcul des probabilités devient l'instrument de choix : il ne s'agit plus seulement de déterminer la chance des joueurs, on lui demande, comme l'avait déjà prévu Jacques Bernoulli, la solution de tous les problèmes nouveaux qui se

posent dans l'ordre social. Mais ces nouvelles applications exigent une finesse et un discernement qui manquent trop souvent à ces novateurs hardis et utopiques ; si elles sont légitimes pour les sciences financières et statistiques, elles perdent toute valeur quand il s'agit de la science morale de l'homme, qui a, suivant l'expression de Royer-Collard, d'autres principes plus mystérieux et plus compliqués devant lesquels la géométrie s'arrête.

L'Essai sur l'application de l'analyse à la probabilité des décisions rendues à la pluralité des voix, donné par Condorcet en 1785, est plutôt fait pour discréditer le calcul des probabilités, et il faut en dire autant de tous les ouvrages du même genre. Qu'il s'agisse de la discussion critique des témoignages et des jugements, ou bien, comme dans les siècles précédents, de questions théologiques, les mathématiques n'ont rien à y voir.

En 1799, cinq ans après sa fin tragique, parut encore un opuscule de Condorcet, écrit pendant les derniers jours de sa vie, et publié par les soins de sa veuve. Intitulé *Moyens d'apprendre à compter sûrement et avec facilité*, c'est un traité d'arithmétique très élémentaire, qui contient des vues philosophiques et pédagogiques inté-

ressantes ; on peut le rapprocher de l'ouvrage posthume de Condillac, la *Langue des calculs*, publié par Laromiguière en 1798, et dont l'influence s'est fait sentir assez longtemps.

Comme Condorcet, Buffon (1707-1788) s'était occupé d'abord de mathématiques ; en 1740, il avait donné une traduction française de la méthode des fluxions de Newton, où il décide trop sommairement contre Leibniz. Ses idées sur les probabilités n'étaient pas toujours justes : cependant, on lui doit la notion toute nouvelle des probabilités géométriques, et son application au célèbre problème de l'aiguille, qui permet de déterminer le rapport de la circonférence au diamètre par le jet répété d'une aiguille sur une feuille de papier réglé. Dans son *Essai d'arithmétique morale* (1777), dont il suffit de lire le titre pour en saisir la tendance, il prône les avantages du système duodécimal, dont Lagrange devait se montrer plus tard l'adversaire déterminé.

La question des élections au scrutin avait été l'occasion d'un mémoire de Jean-Charles Borda dès 1781 ; Laplace lui-même y est plusieurs fois revenu, et d'ailleurs l'Institut national et le Bureau des longitudes à leur création avaient adopté un mode de scrutin fondé sur les principes du calcul des probabilités : on ne tarda pas à s'apercevoir que les intérêts particuliers et beaucoup de considérations étrangères au mérite des candidats, dont l'analyse échappe au calcul, donnaient trop d'avantages aux candidats médiocres.

Dans un ordre un peu différent, il faut citer l'*Essai sur les probabilités de la durée de la vie humaine*, de l'ingénieur hydraulicien Antoine Deparcieux (1703-1768), publié en 1746 : c'était une matière entièrement neuve, du moins en France ; cependant les tables de mortalité dressées par Deparcieux ont fait loi pendant plus d'un siècle.

BEZOUT. PROGRÈS DE L'ALGÈBRE Étienne Bezout (1730-1783), censeur royal, examinateur des gardes du pavillon et de la marine, ainsi que des élèves et des aspirants du corps royal de l'artillerie, a rédigé à l'usage de ces jeunes gens des *Cours de mathématiques* qui ont obtenu un succès légitime et durable. Mais il aimait par-dessus tout l'algèbre ; on lui doit d'importantes recherches sur la résolution algébrique des équations, ce problème qui a fait le tourment des géomètres du dix-huitième siècle ; sur la solution générale des équations linéaires, si difficile à formuler en dehors de la notation des déterminants ; et surtout une théorie générale de l'élimination entre un nombre quelconque d'équations, qui a pu subsister tout entière jusqu'à nos jours. Son livre sur la *Théorie générale*



D'ALEMBERT, D'APRÈS LE PASTEL DE LA TOUR.



ÉTIENNE BEZOUT
(D'après une gravure).

des équations algébriques (1779) est, d'après le jugement de Lagrange, un des rares ouvrages qui sont vraiment utiles aux sciences.

C'est à Lagrange que l'algèbre doit ses plus grands progrès ; mais d'autres encore y ont contribué : parmi eux, Alexandre-Théophile Vandermonde (1735-1796), dont les recherches sur les factorielles et les déterminants sont aussi très dignes d'intérêt ; Jean-Jacques de Marguerie (1742-1779), enseigne des vaisseaux du roi et tué au combat naval de la Grenade, estimé par Lagrange pour avoir formé effectivement une résolvante de l'équation du cinquième degré (1773) ; Achille-Pierre Dionis du Séjour qui a donné en outre, en collaboration avec Mathieu-Bernard

Goudin (1756), un ouvrage important sur les courbes algébriques, où l'on remarque en particulier une proposition que devait retrouver plus tard Poncelet, sur la limite du nombre des tangentes que l'on peut mener à une courbe de degré donné parallèlement à une même direction.

OUVRAGES DIDACTIQUES Nous avons déjà constaté le succès et la diffusion hors de France des ouvrages d'enseignement de Clairaut et de Bezout : ils ne sont pas les seuls. Les leçons élémentaires de mathématiques de l'abbé Nicolas-Louis de Lacaille (1741), rééditées avec de grandes améliorations par l'abbé Marie en 1770, ont obtenu le plus grand succès, surtout en Italie. C'est à Lacaille aussi que l'on doit la première édition des tables logarithmiques à cinq décimales, universellement répandues plus tard sous le nom de tables de Lalande.

Louis-Antoine de Bougainville (1729-1811), le célèbre navigateur et le doyen des élèves de l'éphémère École normale de la Convention, est l'auteur d'un traité de calcul intégral estimé (1752). Les pères Leseur et Jacquier, religieux français

de l'ordre des Minimes, professeurs en Italie, et liés par une tendre amitié, ont publié un commentaire des principes de Newton (Genève, 1739-1742) et un ouvrage sur le calcul intégral (Parme, 1768), justement appréciés tous les deux.

Charles Bossut (1730-1814), examinateur des ingénieurs, professeur royal d'hydrodynamique au Louvre, et l'abbé de La Chapelle (1710-1792) ont pris une part importante à la rédaction des trois volumes de l'*Encyclopédie méthodique* consacrés aux mathématiques (1784); comme Jacques-Antoine-Joseph Cousin (1739-1800), professeur au Collège royal, ils ont contribué par leurs mémoires à l'avancement de la science, et écrit des ouvrages d'enseignement. L'histoire des mathématiques de Bossut (1810) n'est pas sans mérite; cependant elle est loin de valoir celle de Jean-Étienne Montucla (1725-1799); la première édition de cet ouvrage justement célèbre est de 1758; Montucla ne put achever une seconde édition, commencée en 1798, et considérablement augmentée; son œuvre fut complétée par Lalande, et on ne s'en aperçoit que trop.



L'ABBÉ DE LACAILLE
(D'après un portrait de Mlle Le Jeuneux,
gravé par Mlle Devaux).

VI

Nous avons déjà rencontré plus d'une fois les noms de Lagrange et de Laplace : aucun ne leur est supérieur à l'époque qui termine le dix-huitième siècle et ouvre le dix-neuvième; au-dessus des révolutions qui bouleversent alors les empires, ils suffisent pour assurer la prééminence de la science française, dont l'éclat est encore augmenté par les travaux de Monge et de Legendre.

LAGRANGE Joseph-Louis Lagrange est né en 1736 à Turin, capitale du royaume de Sardaigne ; mais son bisaïeul était Parisien d'origine, capitaine de cavalerie en France, avant de passer au service d'Emmanuel II. La ruine de son père dans des entreprises hasardeuses fut une bonne fortune pour la science ; sans elle, peut-être ne se serait-il pas donné aux mathématiques. Il y excella dès qu'il les eut abordées ; avant l'âge de vingt ans, il était professeur à l'École d'artillerie et, avec quelques-uns de ses élèves les plus distingués, fondait l'Académie de Turin, dont les mémoires contiennent ses premières recherches.

Dès lors, on peut constater les admirables qualités de Lagrange. Comme l'a dit Laplace, « il possédait au plus haut point ce tact heureux qui, faisant discerner dans les objets les principes généraux qu'ils recèlent, constitue le véritable génie des sciences, dont le but est la découverte de ces principes ; ce tact, joint à une rare élégance dans l'exposition des théories les plus abstraites, caractérise Lagrange ». Ses mémoires, tous écrits en français, montrent un souci extrême de la perfection de forme et de pensée ; il ne manque jamais de commencer par un exposé historique et critique des travaux déjà consacrés aux questions qu'il veut traiter ; il tend directement au but, en écartant les détails superflus, et la voie qu'il suit semble exclure tout effort, tant elle apparaît naturelle. Ajoutons tout de suite que Lagrange a toujours fait preuve d'une grande douceur de caractère ; ennemi des disputes qui ne servent qu'à faire perdre le temps et le repos, il était modeste et sans passion. Sans goût pour le mariage, s'il épouse une de ses parentes dès son arrivée à Berlin, pour prendre soin de lui et de tout ce qui le regarde, c'est parce que ses confrères sont tous mariés, et la chose



LAGRANGE

(D'après une gravure de Robert Hart).

lui paraît parfaitement indifférente ; plus tard, en 1792, il se maria une seconde fois, avec une fille de l'astronome Lemonnier, qui entoura sa vieillesse de soins dévoués.

Les deux premiers travaux importants de Lagrange étaient bien dignes de lui attirer la faveur des géomètres. Dans les *Recherches sur la nature et la propagation du son*, il montre l'insuffisance de la théorie de Newton, et donne raison à Euler contre d'Alembert dans sa solution du problème des cordes vibrantes. Quant à l'*Essai d'une nouvelle méthode pour déterminer les maxima et les minima des formules intégrales définies*, c'est la première exposition du calcul des variations, c'est-à-dire la solution suivant les seuls principes de l'analyse infinitésimale des problèmes isopérimétriques les plus généraux : cette nouvelle méthode fit l'admiration d'Euler, qui n'avait pas réussi à dégager de considérations géométriques incertaines sa façon de traiter ces problèmes : il lui donna le nom qui lui est resté, et fit associer Lagrange à l'Académie de Berlin dès 1759.

Lauréat de l'Académie des sciences de Paris en 1764 et 1766 pour ses recherches sur la libration de la lune et les inégalités des satellites de Jupiter, Lagrange voulait quitter Turin où personne ne s'intéressait à ses travaux : un voyage à Paris, écourté par la maladie, l'avait mis en relation avec les savants français les plus considérables. Sur la proposition de d'Alembert, il fut appelé par Frédéric II pour présider la classe des mathématiques à l'Académie de Berlin : il y resta vingt ans, de 1766 à 1787, donnant tout son temps à l'étude. La mort du roi amena de grands changements en Prusse : Lagrange, sollicité par les cours italiennes, préféra la patrie de ses aïeux ; on a dit que Mirabeau ne fut pas étranger à sa décision. De ce jour, il est complètement français ; accueilli avec les plus grands honneurs, doté d'un logement au Louvre, il reçut aussitôt de l'Académie, dont il était associé étranger depuis quinze ans, le titre de pensionnaire vétérane, qui lui assurait la plénitude du droit de suffrage.

Mais Lagrange avait alors perdu le goût des mathématiques au point de ne plus s'intéresser à ses propres ouvrages ; la chimie, la philosophie, les sciences naturelles occupaient seules ses loisirs mélancoliques. La Révolution ne l'atteignit pas ; président de la Commission chargée de l'établissement du nouveau système des poids et mesures, il s'y montra le défenseur intransigeant de l'intégrité du système métrique décimal, ne pardonnant pas à Borda d'avoir laissé construire des quarts de mètre. Aux jours de la Terreur, alors que Laplace, Borda, Lavoisier, Coulomb, Brisson et Delambre étaient expulsés de la Commission, comme insuffisamment « dignes de confiance pour leurs vertus républicaines et leur haine pour les rois »,

la position de Lagrange n'est pas ébranlée, et grâce à Guyton de Morveau, un arrêté du Comité de salut public le fait échapper au décret qui bannissait les étrangers, le mettant en réquisition pour continuer des calculs sur la théorie des projectiles.

Nommé professeur à l'École polytechnique et à l'École normale de la Convention, Lagrange retrouva bien vite toute sa vertu mathématique ; il composait en les enseignant sa *Théorie des fonctions analytiques* et ses *Leçons sur le calcul des fonctions*. Membre de l'Institut et du Bureau des longitudes dès leur fondation, membre du Sénat conservateur, grand officier de la Légion d'honneur, comte de l'Empire, il acheva sa carrière en 1813, « n'ayant haï personne et n'ayant point fait de mal » ; ses restes furent portés au Panthéon.

Comme Euler, Lagrange s'est attaqué à tous les problèmes que le progrès des sciences posait de son temps ; mais ses vues sont plus profondes, et il écrit avec plus de soin ; la méthode analytique a toutes ses préférences, et il est de ceux qui ont le plus contribué à l'introduire dans l'enseignement. Dans le domaine des mathématiques pures, ses recherches sur la résolution algébrique des équations méritent la première place : elles sont la base des travaux d'Abel et de Galois, et le germe de la théorie des substitutions. Dès 1772, ayant ramené le problème à l'étude des différentes valeurs que peuvent prendre des combinaisons choisies des racines, lorsqu'on vient à permuer celles-ci de toutes les façons possibles, il pouvait écrire sans témérité : « Voilà, si je ne me trompe, les vrais principes de la résolution des équations, et l'analyse la plus propre à y conduire. » Son *Traité de la résolution des équations numériques*, où il développe sa méthode d'approximation par les fractions continues, est resté célèbre à juste titre.

Avec Euler, Lagrange remet en honneur la théorie des nombres, négligée depuis Fermat ; il démontre pour la première fois quantité de théorèmes que les arithméticiens du dix-septième siècle s'étaient contentés d'énoncer, et aussi le théorème de J. Wilson, communiqué par Waring ; ses travaux sur l'équation de Pell et sur l'analyse indéterminée générale du second degré, où le rôle du discriminant des formes quadratiques est mis en lumière, préparent les voies à Legendre et à Gauss.

Dans son traité des fonctions que nous nommons encore, avec lui, analytiques, Lagrange montre une intuition merveilleuse du rôle essentiel que joue la série de Taylor en analyse ; son mémoire sur la construction des cartes géographiques ajoute des développements importants à la théorie de la représentation conforme, si heureusement inaugurée par Euler. La théorie des suites récurrentes, celle de

l'interpolation algébrique et trigonométrique, celle des équations différentielles linéaires ordinaires et aux différences finies, celles encore des équations aux dérivées partielles du premier ordre et des solutions singulières, sont renouvelées par Lagrange et prennent une forme définitive ; leurs progrès ultérieurs feront ressortir avec une évidence toujours croissante l'importance et la fécondité des notions nouvelles qu'il y introduit, et qui ont gardé son nom, comme la méthode de la variation des constantes, l'équation adjointe, l'intégrale complète, et tant d'autres.

En disant plus loin ce que la mécanique et l'astronomie doivent à leur tour à Lagrange, nous verrons encore son nom grandir.

LAPLACE Pierre-Simon Laplace est né à Beaumont-en-Auge, près de Pont-l'Évêque, le 23 mars 1749 : son père était un modeste cultivateur. A peine âgé de vingt ans il vient à Paris, et conquiert par son mérite bien plus que par les recommandations l'appui de d'Alembert, qui lui fait obtenir une place de professeur de mathématiques à l'École royale militaire. Dès lors commence pour Laplace une période d'activité scientifique prodigieuse ; il présente coup sur coup à l'Académie de nombreux mémoires, et y entre comme adjoint-mécanicien en 1773 : un échec en 1772 lui avait fait désirer un moment sa nomination à l'Académie de Berlin. En 1783, Laplace succède à Bezout comme examinateur de l'artillerie, et c'est en cette qualité qu'il ouvre la carrière au jeune Bonaparte ; pendant la Terreur, après la dispersion des Académies, il vit retiré à Melun, et y rédige l'*Exposition du système du monde*.

La tourmente révolutionnaire passée, une vie nouvelle commence pour Laplace ; son activité scientifique demeure la même, mais il réunit ses travaux antérieurs pour leur donner la forme définitive de traités didactiques ; en même temps, il se mêle à la vie politique. Il est adjoint à Lagrange pour professer les mathématiques à l'École normale de la Convention ; comme Lagrange, il fait partie de l'Institut national et du Bureau des longitudes ; en 1816, il est élu membre de l'Académie française.

Au lendemain du 18 Brumaire, le premier Consul, qui avait connu Laplace comme confrère à l'Institut, et qui tenait à s'appuyer sur les savants, le nomma ministre de l'Intérieur ; le premier acte du nouveau ministre fut de faire obtenir une pension à la veuve de Bailly, mais le grand géomètre n'avait pas les qualités nécessaires pour remplir une fonction si étrangère à ses habitudes d'esprit ; il abandonna le ministère à Lucien Bonaparte au bout de quelques semaines pour entrer au Sénat conservateur, dont il devint bientôt chancelier, en 1803.

Comte d'Empire, grand officier de la Légion d'honneur, Laplace vota la déchéance de Napoléon en 1814, ne retourna pas aux Tuileries pendant les Cent-Jours, fut créé pair de France, puis marquis et grand-croix de la Légion d'honneur par Louis XVIII. Nous n'avons pas les éléments nécessaires pour apprécier sainement une telle évolution, à cette époque troublée par tant d'événements et de passions contradictoires ; il faut aussi se montrer très réservé au sujet des historiettes que se plaisent à raconter Arago et Poincaré sur Laplace, et se souvenir plutôt de la délicate bienveillance qu'il témoignait à Biot et à Poisson.

En 1806, Laplace avait acquis à Arcueil une propriété toute voisine de celle de son confrère et ami Berthollet, le grand chimiste. C'est là que prit naissance la célèbre *Société d'Arcueil*. Laplace et Berthollet réunissaient périodiquement un très petit nombre de savants plus jeunes, leurs élèves pour la plupart, afin de s'entretenir avec eux librement des plus hautes questions scientifiques, particulièrement de celles qui relèvent de la physique générale.

Jusqu'à son dernier jour, Laplace a consacré tous ses instants à la science, sans que sa puissante intelligence montre aucun signe d'affaiblissement : ses derniers travaux ne le cèdent en rien à ceux de sa jeunesse : il est mort à Paris, le 5 mars 1827, cent ans après Newton, presque jour pour jour.

L'esprit philosophique de Laplace, dont on retrouve la manifestation dans presque tous ses écrits, devait nécessairement orienter ses recherches vers les deux grands problèmes qui occupaient alors le monde savant ; les uns tendent au perfectionnement de la théorie des probabilités, surtout au point de vue de leurs applications à la vie civile ; les autres, dont nous nous occuperons plus loin, sont consacrées à l'étude du mouvement et de la figure des astres, comme conséquence de l'unique principe de la gravitation universelle. C'est d'ailleurs dans ses mémoires publiés



LAPLACE
(D'après une lithographie de Boilly).

dans les recueils de l'Académie qu'il faut suivre le progrès des travaux de Laplace, plutôt que dans les grands ouvrages où il les a réunis, et qui ont rendu son nom immortel : l'*Exposition du système du monde*, le *Traité de mécanique céleste* et la *Théorie analytique des probabilités*; dès 1787, il était en possession de tout l'essentiel de ses découvertes.

Laplace n'était pas un pur mathématicien comme Lagrange, dont il n'a pas l'élégante clarté : attiré par les problèmes de la philosophie naturelle, il regardait l'analyse mathématique comme un moyen, et non comme une fin ; il laissait les recherches qui n'ont pas d'utilité immédiate à ceux qui en ont le loisir, reconnaissant d'ailleurs qu'on en fera peut-être un jour des applications importantes. Mais la philosophie naturelle, quand on en écarte toute vaine métaphysique pour la baser uniquement sur l'observation et le calcul, exige des théories mathématiques toujours plus nombreuses et plus élevées : Laplace les édifiera successivement, et cherchera sans relâche à les perfectionner.

Nous ne pouvons ici que rappeler d'un mot les principales : la méthode pour éviter les termes séculaires dans l'intégration des équations de la mécanique céleste, fondée sur la variation des constantes entendue d'une façon toute nouvelle ; la théorie de l'attraction des ellipsoïdes, où Laplace démontre pour la première fois dans toute sa généralité le célèbre théorème relatif aux attractions de deux ellipsoïdes homofocaux sur un même point extérieur, trouvé d'abord par Maclaurin dans un cas particulier, puis étendu successivement par d'Alembert, Lagrange et Legendre ; l'étude de l'équation du potentiel à l'aide des fonctions qui ont gardé le nom de Laplace, et dont le rôle en analyse a toujours été grandissant ; la théorie des fonctions génératrices, à laquelle Laplace rattache un peu artificiellement sa méthode si intéressante d'intégration de certaines équations différentielles ou aux différences finies à l'aide d'intégrales définies ; enfin, les magnifiques recherches sur les intégrales définies et surtout sur les approximations des formules qui sont des fonctions de très grands nombres. On sait que les questions de probabilité les plus simples conduisent bien vite à des formules dont l'utilisation numérique immédiate est absolument impraticable, en raison des nombres « furieusement grands », suivant l'expression de N. Bernoulli, qui y figurent ; dès 1783, Laplace s'applique à résoudre cette difficulté, mais la fécondité des principes nouveaux qu'il développe à cette occasion le mène sans peine à la solution de mainte autre question : c'est ainsi qu'il peut donner la meilleure justification de la méthode des moindres carrés, déjà proposée par Legendre simplement comme avantageuse, et par Gauss, mais en s'appuyant sur des hypothèses discutables ; c'est ainsi encore qu'il peut obtenir pour la première fois

la condition de convergence des séries du mouvement elliptique ordonnées suivant les puissances de l'excentricité : c'est son dernier travail, publié seulement après sa mort, et non le moins remarquable. Laplace s'est occupé aussi, dès le début de sa carrière, des solutions singulières des équations différentielles, et de l'intégration des équations linéaires aux dérivées partielles du second ordre : ses remarquables recherches sur ce dernier sujet sont demeurées classiques. L'introduction à la seconde édition (1814) de la *Théorie analytique des probabilités* est, sous le titre d'*Essai philosophique sur les probabilités*, une exposition magistrale, digne pendant de l'*Exposition du système du monde*, des principes de la théorie des probabilités et de leurs applications les plus intéressantes, sans le secours du calcul. C'est le développement étendu de la dernière leçon de Laplace aux Écoles normales, et c'est là qu'on trouve l'exposé le plus complet des conceptions philosophiques qui lui ont constamment servi de guide, déjà indiquées plus brièvement, mais sans variations sensibles, tout le long de ses mémoires. Sa conception de l'univers est entièrement déterministe ; l'analyse est sa méthode d'investigation par excellence ; les seules bases des connaissances humaines sont l'observation et le calcul ; les moyens d'approcher de la certitude sont l'induction et l'analogie ; d'une façon générale, il suit les encyclopédistes et l'école écossaise, et s'arrête devant les objets qu'il considère comme inaccessibles à l'intelligence humaine, ou qui échappent à tous nos moyens d'observation et de calcul.

Tout en confondant ces deux hommes illustres dans une admiration commune, faut-il comparer Laplace et Lagrange ? Comme dans toutes les causes semblables, chaque partie peut faire valoir les meilleurs arguments ; il semble bien que les contemporains aient donné la préférence à Lagrange, et ses qualités personnelles expliquent ce choix ; pour nous, Laplace l'emporte, et de beaucoup, par la puissance de son génie, par l'unité et l'ampleur de ses conceptions.

MONGE Monge est un grand savant français : c'est aussi le professeur par excellence, aimé de ses élèves parce qu'il les aimait comme un père, se donnant tout à eux ; professeur merveilleux, qui, malgré des dehors peu attrayants et un défaut marqué de prononciation, savait se saisir de ses auditeurs et leur communiquer la flamme qui l'animait. Possédant au suprême degré une intuition nette et singulièrement pénétrante des éléments de l'espace, et pouvant, par le seul mouvement ingénieux de ses mains, dessiner les formes des objets les plus complexes de l'étendue et les rendre comme palpables, il a renouvelé, ou, pour mieux dire, créé la géométrie à trois dimensions, sous la forme descriptive, aussi bien qu'analytique ou différentielle.

Gaspard Monge, né à Beaune en 1746, fit ses études au collège des oratoriens de cette ville ; excellent élève, *puer aureus*, ses maîtres lui confièrent l'enseignement de la physique à leur célèbre établissement de Lyon quand il n'avait encore que seize ans, et pensaient déjà se l'attacher définitivement. Un plan détaillé de sa ville natale, qu'il avait su dresser sans autre secours que sa propre habileté, fut l'occasion de son entrée à l'École du génie militaire, à Mézières ; mais son humble naissance lui



GASPARD MONGE
(D'après une lithographie de Boilly).

fermait la carrière d'officier. Relégué dans la classe des conducteurs et appareilleurs, ce qui lui valut plus tard d'être traité par Mme Roland de maçon parvenu, il ose bientôt substituer la géométrie au calcul pour exécuter un défilement : on dut reconnaître l'excellence de sa méthode, mais on lui fit défense de la rendre publique, afin d'assurer à l'École du génie la supériorité sur l'étranger, et plus encore, peut-être, sur les artilleurs : la géométrie descriptive resta donc secrète jusqu'en 1795. Alors Monge se tourne vers l'analyse et la géométrie transcendante pour créer une autre science nouvelle par leur combinaison. Appelé à Paris en 1780, comme adjoint de Bossut dans sa chaire

d'hydrodynamique, examinateur de la marine en 1783 à la mort de Bezout, il continue ses études de prédilection et s'occupe aussi de physique, de météorologie, et surtout de l'application des mathématiques aux arts de l'architecture et aux machines. Aussi bien put-il rendre d'inappréciables services quand la patrie fut menacée par l'invasion étrangère ; ministre de la Marine pendant quelques mois, il fut ensuite l'organisateur des poudreries et des fonderies de canons : animateur des ateliers pendant le jour, il rédigeait la nuit l'*Art de fabriquer les canons*.

Lorsque les savants les plus éminents furent rappelés pour enseigner à l'École normale de la Convention la science même de l'enseignement, suivant la belle expres-

sion de Dupin, Monge put enfin professer publiquement sa géométrie descriptive, cette science nouvelle qu'il avait créée de toutes pièces, et qui apparaissait comme un des moyens « pour tirer la nation française de la dépendance où elle a été jusqu'à présent de l'industrie étrangère ». En même temps, il prenait une part prépondérante à la création de l'École polytechnique ; il en fut le professeur le plus actif et le protecteur le plus dévoué.

En 1796, Monge est envoyé par le Directoire en Italie, avec Berthollet et divers artistes, pour recevoir les tableaux et statues cédés à la France ; il y devint l'ami du général en chef, qui le chargea avec Berthier de porter à Paris le traité de Campo-Formio. Son amitié pour Napoléon, qu'il aimait « comme on aime une maîtresse », va dominer désormais la vie de Monge. Retourné d'abord en Italie comme commissaire du Directoire auprès de la République romaine, il est bientôt chargé de recruter les savants qui vont donner à l'expédition d'Égypte un caractère unique dans l'histoire : le général en chef souligne ses proclamations du titre de membre de l'Institut national, et son premier soin est de créer l'Institut d'Égypte, sous la présidence de Monge.

Après avoir suivi Bonaparte en Syrie, et être revenu avec lui à Paris, Monge devient sénateur, puis comte de Péluse, et reprend son activité scientifique. Invariablement fidèle à son amour pour Napoléon dans la bonne comme dans la mauvaise fortune, mais accablé par les événements, frappé au cœur par le licenciement de l'École polytechnique, rayé outrageusement de la liste des membres de l'Institut en 1816, affaibli par l'âge, il meurt en 1818, l'intelligence inerte depuis longtemps déjà, insensible même au chant de la *Marseillaise* qu'il avait tant aimée.

La géométrie descriptive actuelle ne diffère sur aucun point essentiel de celle qu'enseignait Monge ; avec l'aide de ses élèves, Hachette, Brisson, Lacroix, il lui a donné tout son développement ; la perspective et l'application aux ombres en font partie, et la géométrie cotée, déjà employée par les géographes et les ingénieurs, comme Ph. Buache, de Châtillon, Milet de Mureau, y est rattachée. Elle vise d'ailleurs plus haut que les applications aux arts : elle est une source de méthodes nouvelles pour la géométrie pure, dont elle agrandit le domaine et accroît la puissance ; c'est ainsi que Monge n'hésite pas à s'appuyer sur le principe de continuité ou des relations contingentes.

Dès 1771, dans son mémoire *sur les développées, les rayons de courbure et les différents genres d'inflexion des courbes à double courbure*, Monge a posé les principes d'une science nouvelle qui recevra tout son développement dans les *Feuilles d'analyse appliquée à la géométrie* à l'usage de l'École polytechnique (an III), première rédac-

tion de son grand traité sur le même sujet. C'est que, pour Monge, il existe une correspondance étroite entre les opérations de l'analyse et celles de la géométrie ; il faut pouvoir écrire en analyse tous les mouvements qu'on peut concevoir dans l'espace, et, inversement, se représenter perpétuellement dans l'espace le spectacle mouvant dont chacune des opérations analytiques est l'écriture. La conception fondamentale de Monge est celle des familles de surfaces, définies par un mode de génération ou une propriété commune, qui se traduit par une équation aux dérivées partielles : de là sa théorie des enveloppes et des caractéristiques, et ses beaux travaux sur les équations aux dérivées partielles, où l'on peut reconnaître le premier emploi des transformations de contact ; toujours guidé par la géométrie, il aperçoit aussi la signification des équations aux différentielles totales qui ne satisfont pas à la condition d'intégrabilité, et qui jusqu'alors étaient regardées comme dénuées de sens. La belle théorie des lignes de courbure, que Lagrange enviait, est entièrement due à Monge. Monge est un chef d'école : c'est de lui que procède la brillante lignée des savants du dix-neuvième siècle qui ont cultivé la géométrie.

Tinseau et le général Meusnier sont deux de ses premiers élèves à l'école de Mézières ; les travaux de Tinseau sur la théorie des surfaces courbes et des courbes à double courbure (1774) sont contemporains des premières recherches de Monge et présentent avec elles plusieurs points communs.

Quant à Meusnier, tombé en héros devant l'ennemi, au siège de Mayence (1793), il complétait à l'âge de vingt-deux ans, en 1776, la théorie d'Euler sur la courbure des courbes tracées sur une surface, par le beau théorème qui ajoute à son nom la gloire du géomètre. Dans le même mémoire, en partant d'une conception particulièrement ingénieuse, il démontre que la courbure moyenne des surfaces minima est nulle, et détermine pour la première fois deux de ces surfaces, l'hélicoïde gauche et le caténoïde.

Il convient encore de ne pas oublier ici deux savants qui ont précédé Monge dans l'étude de la géométrie : Antoine Mauduit (1731-1815), professeur au Collège de France, qui étudie les corps gauches, et distingue le premier deux systèmes de droites sur le paraboloïde hyperbolique ; et Amédée-François Frézier (1682-1773), né à Chambéry, ingénieur et voyageur, officier supérieur dans le corps du génie français, qui a publié à Strasbourg (1738) un ouvrage important sur la théorie et la pratique de la coupe des pierres et des bois, abrégé plus tard sous le titre d'*Éléments de stéréotomie*. Les traités analogues sont à la vérité nombreux, mais dans celui-ci seul, on trouve après Desargues et avant Monge l'application systématique des vrais principes généraux de la géométrie descriptive.

LEGENDRE La vie d'Adrien-Marie Legendre, né à Toulouse en 1752, est aussi calme que celle des savants modernes. Distingué par l'abbé Marie, son maître au collège Mazarin, il est d'abord professeur à l'École militaire, entre à l'Académie des sciences en 1783, et fait partie de la commission chargée en 1787 des opérations géodésiques qui devaient relier les observatoires de Paris et de Greenwich ; sans rôle pendant la Révolution, on le trouve plus tard conseiller de l'Université, examinateur de sortie à l'École polytechnique, et achevant en 1833 sa longue carrière dans l'étude, comme il l'avait commencée et poursuivie.

Le grand nombre de propositions et de méthodes auxquelles reste attaché le nom de Legendre témoigne du bonheur et de la diversité de ses recherches ; trouvant son plaisir dans le travail, il fait preuve d'une grande opiniâtreté, et n'hésite pas à s'engager dans des routes difficiles ; mais il n'a pas cette originalité et cette profondeur de vues qui caractérisent Monge, Lagrange et Laplace. Si ses travaux ont donné naissance aux plus belles théories de l'analyse, ce n'est qu'après avoir été repris par des esprits plus puissants. S'il admire avec un généreux enthousiasme Abel et Jacobi, quand ils pénètrent la véritable signification de ses fonctions elliptiques qui lui avait échappé, il ne voit pas sans amertume l'ampleur nouvelle donnée par Laplace et par Gauss à quelques autres de ses conceptions.

A la suite d'Euler et de Lagrange, Legendre constitue définitivement la théorie des nombres ; dès son premier travail sur l'analyse indéterminée (1785), il démontre,



LEGENDRE

(D'après un dessin de Belliard. Lithographie de Delpéch).

incomplètement il est vrai, la fameuse loi de réciprocité des restes quadratiques, qui a gardé son nom : Euler l'avait déjà énoncée deux ans auparavant, mais Legendre, comme Gauss, l'ignorait. L'*Essai sur la théorie des nombres* (1798), devenu plus tard la *Théorie des nombres*, n'est pas seulement le développement des travaux personnels de Legendre, mais contient tout ce qui était alors connu dans le domaine de l'arithmétique supérieure ; le défaut de conceptions générales y est sensible.

Les recherches de Legendre sur les intégrales elliptiques commencent en 1786, pour continuer jusqu'à la fin de sa vie. La comparaison des arcs d'ellipse et d'hyperbole, les travaux antérieurs d'Euler, d'Alembert, Lagrange, Landen, Fagnano, en sont le point de départ. Mais Legendre se propose plus généralement l'étude méthodique de toutes les intégrales elliptiques, et comme but, la recherche des moyens les plus simples de les calculer effectivement. Malgré la réduction à trois types simples, la construction de tables supprimant tout effort serait impossible : Legendre se borne à en dresser quelques-unes, toujours précieuses, et, pour suppléer à leur insuffisance, multiplie les méthodes et les artifices ; en même temps, il approfondit la théorie des intégrales définies, en particulier des fonctions eulériennes. Les résultats de ses longues et patientes recherches remplissent ses deux grands ouvrages, *Exercices de calcul intégral*, *Traité des fonctions elliptiques*. Pendant quarante ans il les a poursuivies, seul ; en 1826 il eut enfin la grande joie d'apprendre qu'elles avaient excité l'attention de deux jeunes géomètres étrangers, Abel et Jacobi, qui, par le simple jeu de l'inversion, allaient leur donner une orientation nouvelle, infiniment plus féconde ; mais, rebelle à la pure spéculation, bientôt il ne reconnaissait plus sa propre création, et protestait vivement contre « la bizarrerie et l'inconvenance » de l'idée de Jacobi, voulant renverser le sens de l'expression *fonctions elliptiques*.

Les *Éléments de géométrie* de Legendre, dont la première édition date de 1794, ont obtenu un prodigieux succès ; traduits dans toutes les langues européennes et même en arabe, ils ont fixé l'enseignement de la géométrie élémentaire, et si nous n'en suivons plus la lettre, leur esprit est encore dominant. Cependant, ils ne répondent en rien aux vues nouvelles si heureusement formulées par d'Alembert ; bannissant l'intuition, ils se distinguent par la rigueur du raisonnement et l'enchaînement logique des propositions ; les méthodes suivies sont celles d'Euclide et d'Archimède accommodées à la conception cartésienne des grandeurs géométriques comme nombres : il faut signaler toutefois l'heureuse introduction de la notion nouvelle de symétrie. Dans les notes qui terminent l'ouvrage, on trouve la preuve

de l'irrationalité du rapport de la circonférence au diamètre, déjà démontrée par Lambert, et aussi, ce qui est nouveau, du carré de ce rapport.

La théorie des parallèles a fait l'objet constant des méditations de Legendre, et, dans les éditions successives de sa géométrie, on suit la trace de ses vains efforts pour s'affranchir de l'axiome d'Euclide ; il réussit seulement à démontrer que la somme des angles d'un triangle ne peut pas dépasser deux angles droits, et qu'il suffirait de prouver encore qu'elle ne peut être inférieure à cette limite.

La participation de Legendre aux opérations géodésiques l'a conduit à des recherches intéressantes sur les lignes géodésiques des surfaces, qui lui doivent leur nom, en particulier sur celles des sphéroïdes et sur les triangles qu'elles peuvent former : de là son beau théorème sur la façon de ramener la résolution des triangles géodésiques à la trigonométrie plane.

On rencontre les polynômes de Legendre dans son mémoire sur l'attraction des ellipsoïdes : Laplace les généralise aussitôt. Le principe de la méthode des moindres carrés est formulé pour la première fois par Legendre ; sans y mêler aucune considération théorique, il y voit seulement le moyen le plus pratique d'établir une sorte d'équilibre entre les erreurs.

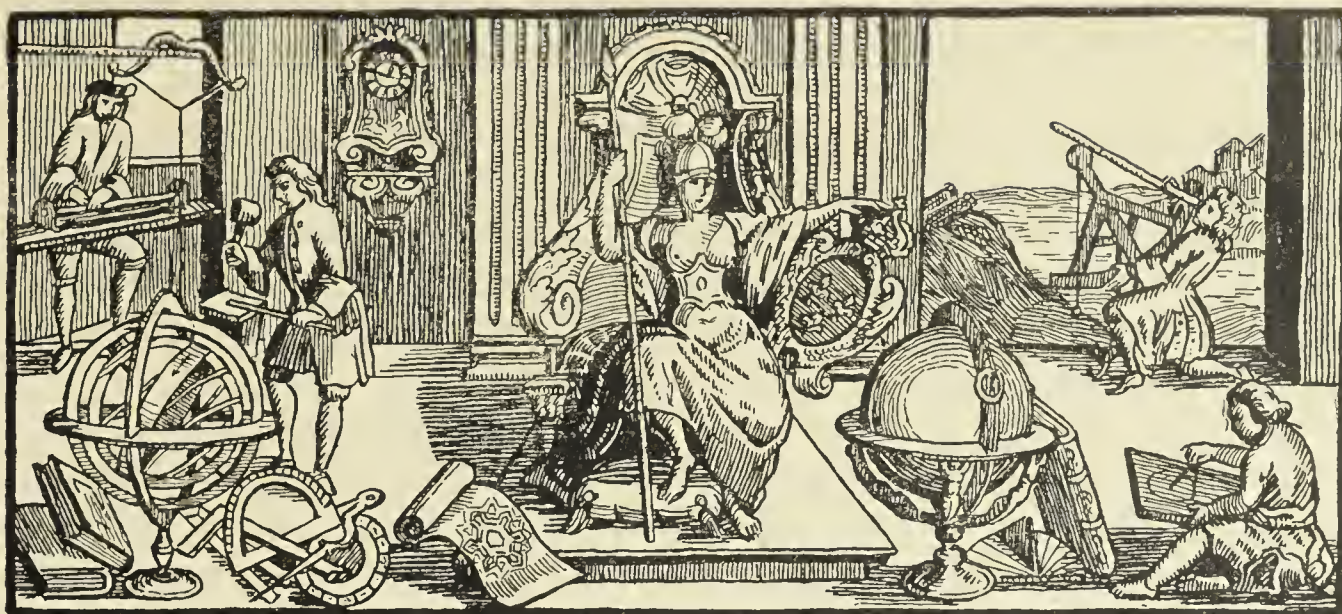
Enfin, le nom de Legendre est resté celui d'une transformation de contact importante dans l'étude des équations aux dérivées partielles ; celui aussi d'une condition nécessaire que doit vérifier la variation seconde d'une intégrale définie pour qu'elle soit véritablement maxima ou minima.

LACROIX Si l'on veut acquérir une idée exacte et complète de l'état de l'analyse au commencement du dix-neuvième siècle, il faut recourir au grand *Traité du calcul différentiel et du calcul intégral* de Sylvestre-François Lacroix (1765-1843) ; la première édition de cet ouvrage date de 1797-1798 ; la seconde, très augmentée, comprend trois volumes publiés entre 1810 et 1819. On y trouvera des détails sur l'œuvre de quelques géomètres que nous n'avons pu citer encore, par exemple le *Calcul des dérivations* d'Arbogast (1759-1803), membre de l'Assemblée législative et de la Convention nationale, recteur de l'Université de Strasbourg ; la théorie des facultés numériques de Christian Kramp (1760-1826), autre savant alsacien ; les recherches sur les équations aux dérivées partielles du premier ordre de Charpit (1784), dont nous savons seulement que « la mort enleva ce jeune homme au moment où ses talents donnaient de grandes espérances ».

Lacroix était lui-même un élève de Monge ; mathématicien sans originalité,

mais d'une grande érudition et d'un solide bon sens, il fut doyen de la Faculté des sciences de Paris lors de la création de l'Université impériale, et professeur au Collège de France en 1815 ; il avait pris la plus grande part à l'organisation de l'enseignement public après la Révolution, et donné à la jeunesse de nombreux traités excellents sur les diverses parties des mathématiques élémentaires et supérieures : il est le trait d'union entre les mathématiciens du dix-huitième siècle et les analystes modernes.





CHAPITRE III

LA MÉCANIQUE ET L'ASTRONOMIE AUX DIX-SEPTIÈME ET DIX-HUITIÈME SIÈCLES

I. Les débuts de la statique. La géostatique. Fermat. Les débuts de la dynamique. Huygens. Varignon. D'Alembert et son temps. La mécanique analytique. Lagrange. Carnot. - - II. Le système de Copernic. Képler. L'abbé Picard. L'Observatoire de Paris. Les Cassini. Les astronomes du dix-huitième siècle. Le problème des parallaxes. La science des longitudes. La figure de la terre. La carte de France. Le système métrique. La mécanique céleste. Laplace. La théorie des marées. Les comètes. La cosmogonie.



LA mécanique et l'astronomie sont des sciences physiques, car elles sont nécessairement fondées sur l'expérience et l'observation ; mais ce sont aussi des sciences mathématiques, et le rôle de l'analyse dans leur développement n'est pas moins important que celui de la physique. C'est l'analyse en effet qui doit réduire à une forme universelle les principes qu'elle reçoit de l'expérience ; c'est elle qui doit montrer que tous les faits observés découlent de l'application des lois générales ainsi formulées ; c'est elle enfin qui doit déduire inversement de ces lois de nouvelles conséquences propres à en faire apprécier la validité, suivant la façon dont elles s'accorderont avec l'observation.

Rappeler en quelques mots les progrès décisifs de la mécanique et de l'astronomie considérées comme sciences purement expérimentales pendant les dix-sep-

tième et dix-huitième siècles ; mais dire plus longuement les efforts des savants français pour les constituer en sciences rationnelles suivant la voie que nous venons de décrire, tel est le but de ce chapitre : nous y retrouverons nécessairement presque tous les noms que nous avons déjà rencontrés, puisque, comme nous l'avons précédemment observé, ces efforts sont précisément l'une des principales sources du progrès des mathématiques pures à cette époque.

Il faut prendre garde d'ailleurs que la mécanique, entendue dans son sens le plus large, touche de près à la philosophie, et qu'elle doit se ressentir des difficultés insurmontables pour l'esprit humain qui se dissimulent sous l'apparente clarté des notions de temps, d'étendue, de mouvement et de force. C'est ce que nous devons constater plus d'une fois, mais sans nous y arrêter, car ce serait dépasser les limites de cette étude. Quel que soit le génie des hommes, même les plus illustres, dont nous aurons à retracer l'influence sur le développement de la mécanique générale, leurs conceptions les plus saines sont presque toujours enveloppées de considérations métaphysiques aussi subtiles que vagues et obscures, appuyées sur des paralogismes ; à côté des vérités qu'ils doivent à leur claire intuition, on rencontre les erreurs les plus graves, surtout lorsqu'ils se laissent entraîner par l'esprit de système ; et, d'autre part, ils dépensent trop souvent une ardeur inutile à soutenir de simples querelles de mots, sans objet réel.

I

LES DÉBUTS DE LA STATIQUE EN FRANCE

Jusqu'au commencement du dix-septième siècle, la mécanique n'est pas une science, du moins dans notre pays ; sans doute on sait construire et perfectionner les machines usuelles ; on connaît aussi le principe de l'équilibre du levier droit suivant Archimède ; mais, dédaignant l'expérience et suivant la physique péripatéticienne, on enseigne que dans la chute libre des corps graves les vitesses sont proportionnelles aux poids. Cette idée nous paraît insoutenable et proprement ridicule ; cependant, Montucla écrit encore, à la fin du dix-huitième siècle, après en avoir fait le procès : « Il y aura sans doute ici bien des lecteurs qui regarderont ce que nous venons de dire comme un paradoxe des plus incroyables. Il leur paraîtra de la dernière évidence qu'un corps dix fois aussi pesant qu'un autre doit acquérir dix fois autant de vitesse. » Combien une telle constatation doit nous inspirer de retenue dans nos jugements

sur nos prédécesseurs et de défiance envers nous-mêmes ! Sommes-nous assurés de n'être pas quelquefois semblables à ces lecteurs ?

L'étude raisonnée de la mécanique, principalement de la statique, s'était développée en Italie dès le seizième siècle : Léonard de Vinci, Tartaglia, Cardan, Guido Ubaldo, Benedetti, Galilée surtout en sont les promoteurs bien connus. Avant eux, un savant anonyme, que P. Duhem a nommé le précurseur de Léonard de Vinci, et que l'on doit considérer comme un continuateur de Jordanus Nemorarius, avait déjà produit une œuvre extrêmement remarquable, dans laquelle on trouve des idées nouvelles sur la dynamique, et la solution des problèmes du levier coudé et du plan incliné d'après les méthodes mêmes de Jordanus, premier germe d'un énoncé correct du principe général des vitesses virtuelles.

En Hollande aussi, Simon Stevin publiait dès 1586 un important traité de statique, où l'on remarque un premier essai de démonstration de la règle du parallélogramme des forces envisagée du point de vue purement statique.

Les savants français ne contribuèrent que plus tard à l'essor des idées nouvelles qui se faisaient jour dans les contrées voisines ; ils ne les ignoraient pas cependant. En 1599, Henri Monantheuil, médecin et professeur au Collège royal, publiait à Paris un commentaire des *Questions mécaniques* d'Aristote, où il cite fréquemment Cardan et Guido Ubaldo. Dans son ouvrage sur les *Raisons des forces mouvantes avec diverses machines tant utiles que plaisantes* (1615), intéressant pour l'histoire de la machine à vapeur, Salomon de Caus emprunte à Cardan le principe de l'égalité entre le travail moteur et le travail résistant, et, par une anticipation remarquable, fait usage de ce mot *travail* dans son acception moderne.



LE PÈRE MERSENNE
(D'après une gravure de Moncornet).

La *Synopsis mathematica* du père Mersenne, publiée en 1626, contient de petits traités où sont reproduites indistinctement toutes les propositions des auteurs anciens ou modernes sur la mécanique, qui sont parvenues à la connaissance de l'auteur.

En 1634, l'attention des géomètres français devait être définitivement fixée sur les problèmes de la statique des corps pesants par la traduction des *mécaniques* de Galilée que donnait Mersenne, par l'édition française des œuvres de Stevin qu'Albert Girard faisait paraître à Leyde, et par la partie du *Cours mathématique* de Pierre Hérigone consacrée à la mécanique, où l'on peut reconnaître les traditions de l'école de Jordanus et l'influence de Stevin.

Roberval s'est beaucoup occupé de mécanique : il avait composé d'abord sur ce sujet un court traité que l'on trouve inséré dans l'*Harmonie universelle* de l'infatigable Mersenne (1636) ; cet opuscule se distingue par deux démonstrations statiques correctes de la règle de composition des forces énoncée par Stevin sans preuves suffisantes. Plus tard, il devait publier un ouvrage beaucoup plus important, un *Traité complet de mécanique* ; trop fidèle à ses habitudes, il l'a conservé manuscrit, et nous n'en connaissons que des fragments inédits, sauf un essai de quelques pages sur les mouvements composés, l'une de ses théories favorites. Dans le *Journal des Savants* pour 1670, on trouve encore la description et l'explication de la « nouvelle manière de balance », ingénieuse et d'apparence paradoxale, inventée par Roberval.

En 1637, à la demande de Constantin Huygens, le père du grand géomètre, Descartes écrivait un petit traité intitulé : *Explication des engins par l'aide desquels on peut avec une petite force lever un fardeau fort pesant*. Cette explication repose « sur un seul principe, qui est que la même force qui peut lever un poids de cent livres à la hauteur de deux pieds, en peut aussi lever un de deux cents livres à la hauteur d'un pied, si tant est qu'elle lui soit appliquée ». En lisant *travail* au lieu de *force*, c'est le principe des travaux virtuels considéré comme la raison même de l'équilibre, et ceci n'est pas nouveau. Ce qui l'est essentiellement, c'est que Descartes reconnaît et affirme explicitement le caractère infinitésimal de son principe, lui donnant par là sa véritable et complète signification : « Notez que je dis *commencer à descendre*, non pas simplement *descendre*, à cause que ce n'est qu'au commencement de cette descente à laquelle il faut prendre garde. » Remarquons encore qu'avec son principe, regardé comme d'évidence immédiate, Descartes rejette l'idée de vitesse, et par suite affranchit la statique de toute notion étrangère prêtant à la critique. Il se sépare aussi nettement de Galilée et de Roberval qui font une conclusion de ce dont il fait un principe ; son insupportable orgueil n'épargne d'ailleurs pas plus

l'un que l'autre, car « il ne voit rien dans les livres de Galilée qui lui fasse envie ni presque qu'il voulût avouer pour sien » ; et quant au *Traité de mécanique* de Roberval, « il pourrait y trouver quantité de fautes, s'il voulait l'examiner à la rigueur » : il aurait mieux fait d'y apprendre les règles de la composition et de la décomposition des forces !

Pascal a dû écrire un petit *Traité de mécanique* qui ne nous est pas parvenu ; la théorie des machines y était fondée sur le principe connu sous le nom de Torricelli : dans le cas de l'équilibre, le centre de gravité des poids ne saurait jamais descendre. On peut voir par ailleurs que Pascal utilisait aussi l'axiome de Descartes ; mais nous n'insisterons pas sur ses travaux si importants pour l'histoire de la physique : l'étude du repos ou du mouvement des fluides n'intéresse pas encore les mathématiques.

LA GÉOSTATIQUE. Une question se pose ici nécessairement. Comment, à l'époque qui nous occupe, comprenait-on la gravité ? Quelques lignes empruntées à la *Synopsis* du père Mersenne vont nous montrer que, si les conceptions scolastiques subsistent encore, l'influence de Copernic et de Képler commence cependant de se manifester, et que le temps de Newton approche : « Le centre de l'univers est ce point vers lequel tous les graves se portent en ligne droite ; il est probable qu'il existe un centre spécial de gravité en chacun des systèmes particuliers qui composent l'univers ; il est donc bon de ne rien affirmer à la légère du centre de l'univers... Qui sait si les pierres, soulevées vers un astre, reviennent à la terre ? Des pierres qui seraient plus proches de la lune que de la terre descendraient-elles sur la terre ou sur la lune ? »

La même incertitude s'attache à la notion de centre de gravité. Comme l'explique si heureusement Duhem, l'idée toute scolastique d'un centre de gravité invariablement lié à chaque corps solide n'a de sens qu'autant que les verticales sont traitées comme parallèles entre elles ; c'est donc une absurdité que de vouloir attribuer à ce point une tendance à s'unir au centre de la terre ; la seule considération du centre de la terre suffit à rendre illégitime celle du centre de gravité.

Pour mettre en lumière ces vérités importantes, il a fallu la querelle des géostaticiens. Selon de Beaugrand, dont la *Géostatique* parut à Paris en 1636, un corps pesant devient d'autant plus léger qu'il s'approche du centre de la terre et ne pèse plus rien lorsqu'il se joint à ce centre : que Descartes s'en soit immédiatement fait un ennemi n'a rien pour nous surprendre. De son côté, Fermat *errat toto cælo* quand il s'agit de mécanique ; il avait avancé une proposition géostatique tout aussi peu raisonnable,

qui le menait à corriger Archimède. Une critique irréfutable en fut faite par Étienne Pascal et Roberval, avec une courtoise mais ferme précision. Deux ans plus tard, en 1638, Descartes expose encore la question d'une façon décisive ; mais tout le nécessaire avait été dit déjà.

On sait les démêlés de Fermat avec Descartes au sujet de l'explication des lois de la réfraction de la lumière. Postérieurement à la mort de Descartes, Fermat fut amené à énoncer le principe d'optique qui a gardé son nom : il est intéressant pour l'histoire de la mécanique, parce que c'est le premier énoncé moderne d'une de ces nombreuses lois de minimum que l'on rencontre en cette science, et que, cédant à des considérations métaphysiques ou théologiques, on a longtemps expliquées par leur finalité. « La nature agit toujours par les voies les plus courtes et les plus aisées », tel est le principe de physique que Fermat expose à Clerselier ; partant de là, et supposant, contrairement à l'opinion de Descartes et des *descartistes*, que la lumière se meut plus lentement dans les milieux les plus denses, il fait voir, par une heureuse application aux quantités radicales de sa méthode *de maximis et minimis*, que la lumière, dans tous ses mouvements, suit le chemin qui correspond au temps le plus court : c'est ce qu'avait déjà observé Héron d'Alexandrie dans le cas très simple de la réflexion. Si l'on reprend l'hypothèse de Descartes avec la théorie de l'émission, le principe de Fermat se modifie, mais conserve sa qualité caractéristique : il devient le principe de la moindre action ; pour l'adapter à tous les cas, il suffit de dire que le chemin optique est minimum.

LES DÉBUTS DE LA DYNAMIQUE. HUYGENS

En étudiant rationnellement et formulant pour la première fois les lois de la chute des graves et du mouvement des projectiles, Galilée a donné naissance à la dynamique moderne ; il a découvert aussi le principe de l'inertie et celui de la composition des mouvements au point de vue dynamique. Sans doute, comme dans tous les cas semblables, on peut lui trouver des précurseurs, car, on l'a dit avec raison, il n'y a pas de génération spontanée dans la science ; et, d'autre part, il n'a pas énoncé, ni encore moins conçu les principes que nous lui devons avec cette rigoureuse précision que le temps peut seul amener, par la clarification des idées : mais c'est son influence qui a vraiment *déterminé* une science nouvelle. Comme toujours encore, ses théories, si contraires aux idées courantes, furent accueillies par les uns, repoussées par les autres.

En France, parmi les premiers défenseurs de Galilée, on trouve Fermat et Gassendi. Pierre Gassendi ou plus exactement Gassend (1592-1655), né près de Digne, prévôt de la cathédrale de cette ville, puis professeur au Collège royal en 1645,

sur les instances du cardinal de Richelieu, archevêque de Lyon, cultivait avec un égal succès la physique, l'astronomie et la philosophie ; il est connu comme adversaire d'Aristote aussi bien que de Descartes, et partisan des atomes d'Epicure. En 1645, Gassendi, aidé bientôt de Fermat, réfutait le père Cazrée, jésuite, qui voulait démontrer par ses expériences que les vitesses des corps graves en chute libre sont proportionnelles aux espaces parcourus.

Vers la fin du dix-septième siècle, François Blondel, le fameux architecte de la porte Saint-Denis, ne se refusait-il pas encore à concevoir les raisonnements de Galilée, qu'il traitait de paralogismes, tandis que l'ingénieux carme Jean-Sébastien Truchet, plus connu sous le nom de père Sébastien, construisait une élégante machine pour en faire sentir toute l'exactitude ?

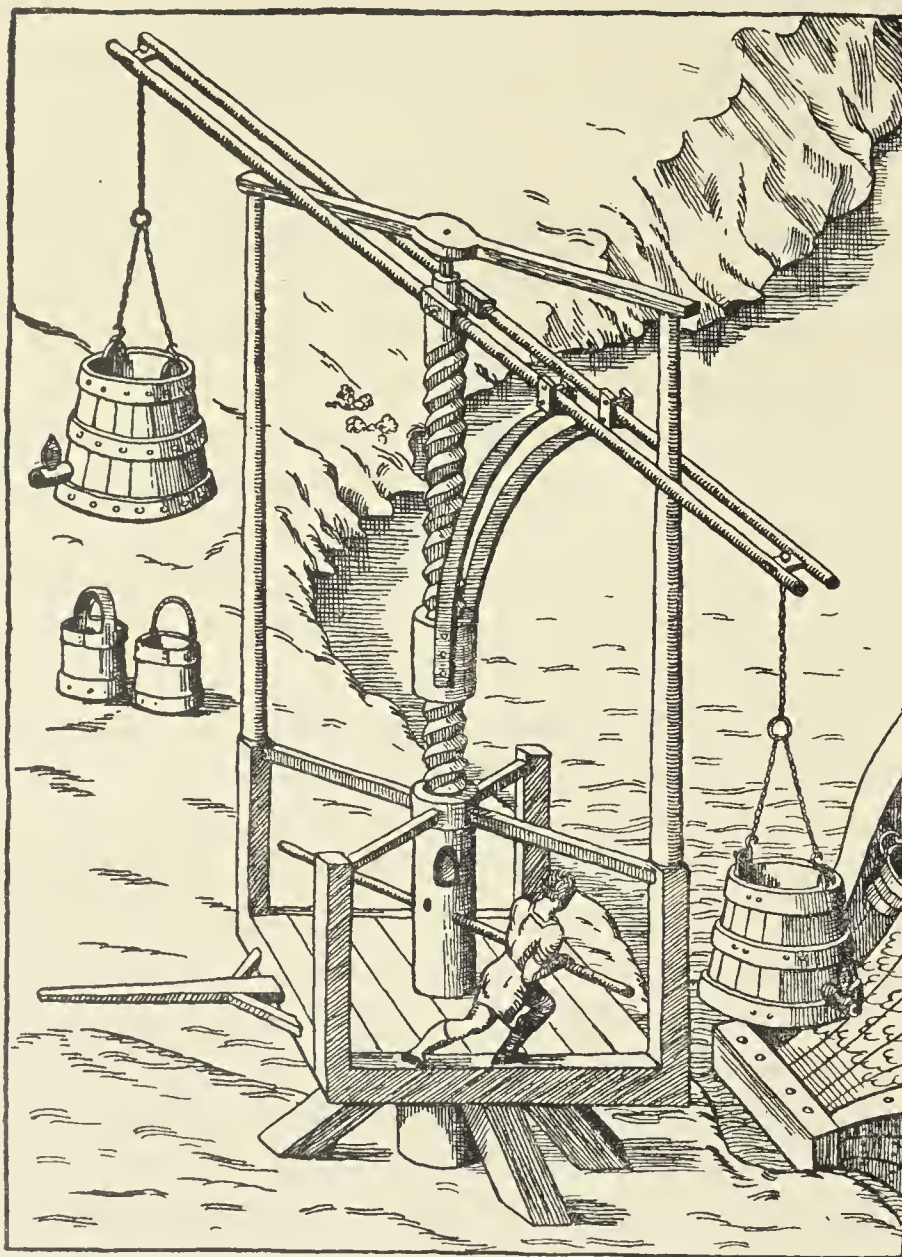
Descartes ne s'est pas occupé seulement de statique. Repoussant les qualités occultes et les formes substantielles, il a voulu ramener tous les phénomènes de l'univers à la matière et au mouvement, c'est-à-dire aux lois de la mécanique ; mais ces lois n'étaient pas encore assez solidement établies pour lui permettre d'édifier une théorie adéquate à sa grandiose conception ; la célèbre hypothèse des tourbillons de matière subtile, au sein desquels circulent les astres, a pu préparer la grande découverte de Newton : malgré la puissance de son attrait, elle devait nécessairement succomber, dès que son incompatibilité avec les phénomènes serait devenue évidente.

Pour ne pas sortir des limites de notre étude, nous devons nous borner à dire ici que Descartes paraît avoir conçu au moins aussi nettement que Galilée le principe de l'inertie et celui de l'indépendance des effets des forces ; mais il suppose d'une façon arbitraire autant qu'inexacte que la somme arithmétique des quantités de mouvement des diverses parties de l'univers reste constante. Comme application, il étudie le choc des corps et les lois de la communication du mouvement, et multiplie les erreurs, affirmant par exemple qu'un corps qui en choque un autre ne peut lui imprimer de mouvement que s'il a une masse supérieure : c'était oublier de soumettre la théorie au contrôle de l'expérience.

L'ouvrage publié à Lyon en 1646 par le jésuite Honoré Fabry, sous le nom d'un ami, le médecin Pierre Meusnier, n'a pas fait faire de progrès à la mécanique.

En 1669 seulement, pour répondre à un concours institué par la Société royale de Londres, Huygens, Wallis et Wren donnèrent des solutions correctes du problème du choc ; peut-être avaient-ils eu connaissance du livre de Marcus Marci (Prague, 1639). Huygens n'envisage que les corps durs, c'est-à-dire élastiques ; par son ingénieuse fiction d'une barque mobile, qui correspond à la notion profonde

de relativité du mouvement, il ramène la question générale à son cas le plus simple ; il rectifie l'énoncé de Descartes relatif à la conservation de la quantité de mouvement,



« Machine récente et nouvelle (faicte par la balance) à l'aide de laquelle on décharge aisément les bateaux qui sont parvenus à port pleins ou d'eau douce ou d'autres choses menues et mesurables ».
(D'après le *Theatrum instrumentorum*, de Besson. 1578).

en restituant à celle-ci sa direction ; il observe aussi la conservation des forces vives. Dans son *Traité de la percussion* (1677), l'abbé Mariotte décrit les moyens de vérifier expérimentalement ces lois.

Entre Galilée et Newton, Huygens tient une place non moins éminente dans l'histoire de la mécanique. Son plus bel ouvrage, *l'Horologium oscillatorium*, appartient à la période française de sa vie, et contient un grand nombre de théories nouvelles, sur lesquelles nous devons nous arrêter. Après avoir décrit son horloge à pendule, Huygens reprend l'étude de la chute des graves, en l'appuyant sur ce principe qu'un point pesant ne peut pas remonter

plus haut que son point de départ, c'est-à-dire sur l'impossibilité du mouvement perpétuel ; il établit ensuite le tautochronisme du pendule cycloïdal, ce qui l'amène, comme nous l'avons vu précédemment, à la théorie des développées et développantes. La quatrième partie est d'une importance capitale : c'est la théorie

du pendule composé, et la première extension de la dynamique aux systèmes matériels. Le problème de la détermination du centre d'oscillation, ou de percussion, ou encore d'agitation d'un corps quelconque n'était pas encore résolu ; quand Mersenne l'avait proposé aux géomètres, Huygens était trop jeune pour en trouver une solution satisfaisante ; Descartes et Roberval n'avaient pu le traiter que dans des cas particuliers, et là encore, avaient trouvé matière à controverse : les vues de Roberval étaient d'ailleurs de beaucoup les plus justes. En étendant son principe au centre de gravité d'un système de points pesants d'abord liés entre eux, puis dégagés de leurs liaisons, Huygens découvre facilement le centre d'oscillation et la longueur du pendule simple synchrone, ainsi que la réciprocité entre les axes de suspension et d'oscillation. L'*Horologium oscillatorium* se termine par la théorie de la force centrifuge dans le mouvement circulaire et son application au pendule conique ; mais les théorèmes y sont énoncés sans démonstration.

Neuf ans plus tard, en 1682, le principe d'Huygens fut attaqué par l'abbé Catelan, qui ne se montra pas plus heureux dans cette tentative que dans sa précipitation à profiter indiscretement de ce qu'il avait pu entendre touchant les nouveaux calculs. Dans sa facile défense, Huygens fut secondé par Jacques Bernoulli et le marquis de L'Hôpital, qui, par un raisonnement fondé sur les règles de la statique, retrouvèrent la solution si malencontreusement contestée.

Huygens était un disciple de Descartes, et rejetait l'attraction réciproque de Newton comme qualité occulte ; cependant, il a bien senti que le système des tourbillons était contradictoire avec la théorie des forces centrifuges ; il a donc émis de nouvelles hypothèses sur le mouvement de la matière éthérée : mais le remède parut pire que le mal.

VARIGNON ET SES CONTEMPORAINS En 1675, le roi voulut que l'Académie travaillât incessamment à un traité de mécanique où la théorie et la pratique fussent expliquées d'une manière claire et à la portée de tous ; Colbert le fit savoir à la compagnie ; Huygens, Picard, Mariotte, Blondel, Roberval et Rømer travaillèrent aux préliminaires... et tout se passa en vaines paroleries. Cependant la mécanique prenait une place importante dans les encyclopédies comme le *Cursus seu mundus mathematicus* du jésuite Claude-François Milliet Dechaes (Lyon, 1674) ; on publiait même des ouvrages spéciaux, comme la *Statique* du père Ignace-Gaston Pardies, jésuite encore, adversaire de Descartes, et les *Traité de mécanique* du père Bernard Lamy, prêtre de l'Oratoire (Paris, 1679) ; on peut encore citer le *Traité de physique* de Jacques Rohault, élève et ami de Cyrano de

Bergerac, gendre de Clerselier. Tous ces ouvrages sont fort médiocres, et démontrent plutôt une époque de décadence.

Mais en 1687, Pierre Varignon publiait son *Projet d'une nouvelle mécanique*; il travailla toute sa vie au livre ainsi annoncé, qui ne fut imprimé que trois ans après sa mort, en 1725. Pour Varignon, toute la statique dérive de la loi de composition des forces, et nombre de ses procédés sont demeurés classiques; en particulier son nom est resté attaché au théorème des moments, qui n'avait encore été aperçu que dans le cas où le centre des moments est pris sur l'une des forces à composer ou sur leur résultante. En même temps que Varignon, le père Lamy trouvait de son côté, et d'une façon vraisemblablement indépendante, la même méthode de réduction de la statique à la règle du parallélogramme des forces; et l'on doit constater que la façon dont procède Lamy est de beaucoup supérieure à celle de Varignon. Tous deux en effet font appel à la composition des mouvements, mais Varignon admet l'axiome d'Aristote que les espaces parcourus sont proportionnels aux forces, sans spécifier comme Lamy qu'il ne s'agit que des espaces parcourus dans le premier instant; c'est d'ailleurs la même voie que suit Newton, en introduisant la notion de *vis impressa*. Il ne faut pas peut-être attacher trop d'importance à ces distinctions qui ne deviennent sensibles que pour la postérité: le langage de la mécanique est resté très longtemps imprécis, même chez les plus grands géomètres, et il serait injuste de juger leurs idées à la mesure de cette imprécision.

On trouve dans la *Nouvelle mécanique* de Varignon un document fondamental, la lettre que Jean Bernoulli lui avait adressée de Bâle le 26 janvier 1717, et qui contient l'énoncé définitif et complet du principe des vitesses virtuelles, ou plus exactement des déplacements virtuels, car la notion de temps y est étrangère. Varignon, méconnaissant encore son caractère unique d'universalité et de fécondité, n'y voit qu'un corollaire général de sa théorie fondée sur le parallélogramme des forces.

LA MÉCANIQUE AU COMMENCEMENT DU DIX-SEPTIÈME SIÈCLE

La première édition des *Principes mathématiques de la philosophie naturelle* parut en 1687: cette date marque le début d'une ère nouvelle dans l'histoire des sciences, plus particulièrement de la mécanique. Rapprochant et généralisant les vérités partielles que ses prédécesseurs n'avaient pu manquer d'entrevoir, le génie de Newton sut en faire une doctrine cohérente entièrement nouvelle; une claire intelligence des premiers principes de la mécanique lui permit de tirer des découvertes de Képler et de Galilée la loi de la gravitation universelle: chaque molécule de matière attire toutes les autres en raison de sa masse et réciproquement

au carré de sa distance à la molécule attirée. « Parvenu à ce principe, dit Laplace, Newton en vit découler tous les grands phénomènes du système du monde », les lois de l'attraction des sphères composées de couches homogènes, l'aplatissement de la terre et la variation de la pesanteur à sa surface, les raisons du flux et du reflux de la mer, la précession des équinoxes, les perturbations des mouvements célestes, etc. Mais toutes ces théories, qui constituent la mécanique céleste, n'ont pu qu'être ébauchées par Newton, en raison de l'insuffisance de l'analyse, encore en enfance. « On doit à la France la justice d'observer que si l'Angleterre a eu l'avantage de donner naissance à la découverte de la pesanteur universelle, c'est principalement aux géomètres français et aux prix décernés par l'Académie des sciences que sont dus les nombreux développements de cette découverte, et la révolution qu'elle a produite dans l'astronomie, devenue la solution d'un grand problème de mécanique. » C'est ce que nous analyserons plus loin.

Plus encore que les méthodes du calcul infinitésimal, la théorie de l'attraction universelle, lorsqu'elle fut connue en France, se heurta à la plus vive opposition. L'action à distance, à travers le vide et sans intermédiaire, n'était-elle pas une de ces qualités occultes définitivement prosrites par Descartes? Et pourtant, lorsque le succès de la loi de Newton en astronomie sera devenu incontestable, cette même action dominera toute la physique; c'est sur les forces attractives et répulsives que Laplace construira la théorie des gaz, de la chaleur, de la lumière, ou de la capillarité : « Tous les phénomènes terrestres dépendent de ces grandes forces, comme les phénomènes célestes dépendent de la gravitation universelle. »

Le demi-siècle nécessaire à l'affermissement de la loi de Newton est pour la mécanique une période de confusion extraordinaire, occupée presque uniquement par des dissertations métaphysiques, où la sagesse du Créateur est sollicitée dans des directions contradictoires, et dont le seul effet est de répandre des ténèbres de plus en plus épaisses sur les questions relatives à la nature du mouvement, de l'action et des forces.

Leibniz, par exemple, critique vivement l'intervention de la Divinité que Newton croyait nécessaire pour remettre en ordre le système solaire, et celui-ci répliquait par une critique aussi vive de l'harmonie préétablie, qu'il qualifiait de miracle perpétuel. Le père Castel, le savant critique du *Journal de Trévoux*, croit avoir porté les derniers coups au système de Newton, par son *Traité de la pesanteur universelle* (1724). En 1758, l'Académie de Berlin proposait encore l'examen de la question : *si les lois de la statique et de la mécanique sont de vérité nécessaire ou contingente?*

Une des plus mémorables disputes, que l'on vit ainsi se prolonger pendant plus

de cinquante ans, est celle des forces vives, soulevée par Leibniz en 1686, et qui faisait encore l'objet des premières méditations de Kant en 1746. Si, pour nous, l'expression *force vive*, conservée on ne sait pourquoi, ne sert qu'à désigner une combinaison analytique parfaitement définie, et ne correspond à aucune conception métaphysique *a priori*, il n'en est pas de même chez Leibniz ; pour lui, la force vive est la force des corps en mouvement, tandis que la force morte est celle des corps qui sont seulement dans une tendance à se mouvoir. L'objet de la dispute était la manière dont on doit estimer la force des corps en mouvement — par la vitesse (soit la quantité de mouvement) comme Descartes, ou par le carré de la vitesse comme Leibniz. Il est clair que la chose est indifférente, et qu'il ne s'agit que d'une querelle de mots, d'une inutilité parfaite pour la mécanique, suivant l'expression de d'Alembert : et, en effet, le même problème, résolu par les géomètres des deux partis, avait la même solution.

En 1724, l'Académie des sciences de Paris avait proposé pour sujet d'un de ses prix les lois de la communication du mouvement : le père Mazière, prêtre de l'Oratoire, auteur d'un traité des petits tourbillons de la matière subtile, obtint le prix ; le discours célèbre où Jean Bernoulli, cartésien cependant suivant l'occasion, défendait l'opinion de Leibniz sur les forces vives, fut imprimé aussi, mais dut se contenter d'éloges. Plus tard, on voit la marquise du Châtelet défendre encore Leibniz contre de Mairan, et Voltaire, géomètre fantaisiste, se ranger aux côtés de ce dernier : il était mieux dans son rôle lorsque, par ses *Lettres sur les Anglais*, et par ses *Éléments de la philosophie de Newton mis à la portée de tout le monde*, il préparait, avec Maupertuis et d'autres que nous avons nommés antérieurement, l'avènement d'une science toute française, la mécanique céleste.

Mais c'est assez nous arrêter sur les sommets nuageux où se plaisait alors la philosophie ; si nous ramenons les yeux sur la mécanique simplement rationnelle, nous constatons que ses progrès sont surtout ceux de l'analyse ; comme nous l'avons déjà rapporté, le développement des méthodes infinitésimales permettait aux géomètres de résoudre les problèmes nouveaux et jusqu'alors inabordables que leur suggérait une observation plus attentive des phénomènes ; mais ils manquaient de règles générales pour établir les équations dont l'analyse devait fournir la solution, et, suivant l'expression de Lagrange, il fallait toujours une adresse particulière pour démêler dans chaque problème toutes les forces auxquelles il était nécessaire d'avoir égard, ce qui rendait ces problèmes piquants et propres à exciter l'émulation.

C'était au principe d'Huygens que l'on avait le plus souvent recours, quoiqu'il

ne pût fournir qu'une seule équation. Avec Jean Bernoulli, ce principe était devenu celui de la conservation des forces vives, élevé au rang d'une loi générale de la nature, conséquence de la théorie des forces vives ; pour les autres mécaniciens, c'était plutôt un théorème, la loi des forces ascensionnelles.

Durant tout le commencement du dix-huitième siècle, le rôle des géomètres français reste effacé ; l'histoire de l'Académie et le *Journal des Savants* ne nous apportent que les échos des progrès réalisés par les Bernoulli, Euler, Taylor, Mac-laurin, etc. Cependant, si notre étude devait s'étendre jusqu'à l'art de l'ingénieur, il faudrait citer avec honneur, entre beaucoup d'autres, les noms de Bernard Renau d'Elicagaray (1652-1719), de Henri Pitot et de Pierre Bouguer (1698-1758), en raison surtout de leurs efforts pour donner une base scientifique à la construction et à la manœuvre des vaisseaux. C'est à Bouguer en particulier que l'on doit la première étude de la stabilité de l'équilibre d'un flotteur, fondée sur la considération du métacentre.

D' L'année 1743 vit paraître à la fois la *Théorie de la figure de la terre tirée des principes de l'hydrostatique*, de Clairaut, et le *Traité de dynamique*, de d'Alembert, dans lequel les lois de l'équilibre et du mouvement des corps sont réduites au plus petit nombre possible, et démontrées d'une manière nouvelle, et où l'on donne un principe général pour trouver le mouvement de plusieurs corps qui agissent les uns sur les autres d'une manière quelconque. C'est le commencement d'une ère particulièrement glorieuse pour les géomètres français, et c'est à peine si nous pourrions suffire dorénavant à signaler en quelques mots, parmi tant d'œuvres excellentes, celles qui marquent véritablement dans le développement de la science.

Nous parlerons plus loin de l'objet propre de l'ouvrage de Clairaut : rappelons seulement ici qu'on y trouve les équations générales, insuffisamment connues jusqu'alors, de l'équilibre des fluides homogènes ou hétérogènes, soumis à des forces quelconques extérieures ou intérieures, qui doivent cependant vérifier une condition nécessaire préalable ; il contient aussi la première théorie mathématique de la capillarité, contestée d'ailleurs par Laplace.

Le *Traité de dynamique* apparaît comme une œuvre magistrale et digne de son titre ; les considérations philosophiques y tiennent peu de place, sauf dans le discours préliminaire, quoique l'auteur s'en défende ; mais comment aurait-il pu s'y soustraire ? Pour d'Alembert, trois principes suffisent à la mécanique : l'inertie, le mouvement composé et l'équilibre entre deux corps ; ces principes doivent être tirés

de la considération seule du mouvement, et tout ce qu'on voit distinctement dans le mouvement d'un corps, c'est qu'il parcourt un certain espace, et qu'il met un certain temps à le parcourir ; si d'Alembert emploie le mot de dynamique, ce n'est que pour se conformer à l'usage, car il envisage la mécanique comme la science des effets, et non comme celle des causes motrices. Tout ceci peut prêter à discussion :



D'ALEMBERT

(D'après un dessin de Massard, gravé par Weber).

mais on sent que la mécanique se dégage enfin de la métaphysique.

Le fameux *principe de d'Alembert* n'est qu'une combinaison de ceux de l'équilibre et du mouvement composé ; en ramenant le problème du mouvement à celui du repos, il offre une méthode générale pour résoudre ou du moins mettre en équations tous les problèmes de dynamique. D'Alembert en montre l'usage dans un petit nombre de problèmes choisis, quelquefois difficiles, les uns déjà connus, d'autres nouveaux, et d'autres encore, jusqu'alors mal résolus même par les plus savants mathématiciens ; il en déduit les propriétés du centre de gravité, les lois du choc, et la démonstration du théorème des forces vives.

Jacques Bernoulli et quelques autres avaient déjà ramené la recherche du centre d'oscillation à

la statique, et, pour donner au principe d'Huygens une évidence plus immédiate, fait des remarques qui se rapprochaient du principe de d'Alembert, mais sans en voir aucunement la féconde généralité.

On a donné de ce principe bien des énoncés divers, pour en faciliter l'application, et pour nous, il n'est qu'une manière d'interpréter les équations générales du mouvement. Il n'est pas inutile de rappeler sous quelle forme l'a présenté son auteur, en modernisant seulement le langage : si l'on décompose les forces appli-

quées aux différents points d'un système en forces effectives et en forces de liaisons, ces dernières se font équilibre en vertu des liaisons.

D'Alembert, une fois muni de son principe, montre une activité incroyable, et publie, en l'espace de quelques années, nombre d'ouvrages et de mémoires importants. Dans son *Traité de l'équilibre et du mouvement des fluides* (1744), dans ses *Réflexions sur la cause générale des vents*, couronnées par l'Académie de Berlin en 1746, et surtout dans son *Essai d'une nouvelle théorie de la résistance des fluides* (1752), il donne le premier les équations générales du mouvement des fluides incompressibles ou élastiques, réduisant ainsi l'hydrodynamique à l'analyse, mais à une analyse nouvelle, puisque ces équations sont aux dérivées partielles : avant lui Jean Bernoulli et son fils Daniel, ce dernier s'appuyant sur le principe des forces vives, n'avaient pu atteindre l'hydrodynamique que très imparfaitement.

Dans les *Recherches sur la précession des équinoxes et sur la nutation de l'axe de la terre dans le système newtonien*, de 1749, d'Alembert fait connaître les conditions analytiques de l'équilibre d'un corps solide mobile autour d'un point fixe, et de là, par son principe, obtient les équations du mouvement : il ne restait à Euler que le soin de leur donner une forme définitive.

On trouverait encore dans le grand ouvrage intitulé *Recherches sur différents points importants du système du monde* (1754-56), dans les huit volumes d'*Opuscules mathématiques* publiés de 1761 à 1780, et dans l'*Encyclopédie*, de nombreux éclaircissements sur la mécanique pure, quelquefois contestables, toujours intéressants ; car il ne faut pas oublier que Lagrange et Laplace procèdent de d'Alembert au moins autant que d'Euler.

Le principe de la moindre action et le nom de Maupertuis sont inséparables. Déjà en 1740, Maupertuis avait proposé une *loi de repos*, généralisée ensuite par Euler : en supposant des corps soumis à l'action de forces centrales, la condition de leur équilibre est celle du maximum ou du minimum de la fonction de forces ; bien entendu, cette expression ne figure pas dans l'énoncé de Maupertuis. Ajoutons tout de suite que le marquis de Courtivron, mestre de camp de cavalerie et géomètre en ses loisirs, donnait quelques années plus tard un autre principe équivalent : de toutes les situations que prend un système, celle où il a la plus grande ou la plus petite force vive est aussi celle où il faudrait le placer d'abord pour qu'il restât en équilibre.

En 1744, à Paris, dans un mémoire intitulé *Accord des différentes lois de la nature qui avaient jusqu'ici paru incompatibles*, Maupertuis reprend le principe d'optique de Fermat, interprété déjà par Leibniz d'une façon différente, pour l'accommoder

à la théorie de l'émission de la lumière, qui régnait sans conteste depuis Newton, et lui donne une nouvelle forme : le chemin que tient la lumière est celui pour lequel la quantité d'action est la moindre ; quant à la quantité d'action, la dépense en quelque sorte que fait la nature dans le mouvement d'un corps, elle est proportionnelle à la somme des espaces parcourus multipliés chacun par la vitesse avec laquelle le corps les parcourt. Devant l'Académie de Berlin, en 1746, Maupertuis applique des considérations analogues au choc des corps, et détermine les vitesses après le choc en rendant minima une action, qui n'est définie que d'une façon fort incertaine.

Les conceptions purement finalistes de Maupertuis, primitivement vagues et obscures, ne sont cependant pas restées stériles ; Euler, le premier, les a perfectionnées, en se tenant encore au même point de vue ; mais Lagrange leur a donné leur véritable sens, en faisant du principe de la moindre action, non plus une loi d'essence métaphysique, mais un simple résultat général des équations du mouvement. Dès 1760, dans un important mémoire des *Miscellanea Taurinensia*, remarquable ébauche de la *Mécanique analytique*, il montrait comment on peut en tirer toutes les équations nécessaires pour la solution de chaque problème de dynamique, quand on le combine avec celui des forces vives, et qu'on le développe suivant les règles du calcul des variations.

Nous avons déjà fait allusion à la violente querelle que suscita Samuel Kœnig, géomètre hollandais, ancien ami et commensal de Maupertuis, et l'un de ceux qui avaient initié Mme du Châtelet à la science, en contestant l'exactitude du principe de la moindre action, et surtout en prétendant qu'il avait été connu de Leibniz : tout Berlin en fut agité, et l'intervention de Frédéric et de Voltaire en fit une affaire qui cesse de nous intéresser.

Le chevalier d'Arcy, compagnon d'études de Clairaut, maréchal de camp et artilleur distingué, attaquait aussi le principe de Maupertuis, contestant surtout le sens qu'on devait donner au mot action ; sous le nom de principe de la conservation de l'action, il lui opposait le théorème des aires qu'il avait déjà énoncé en 1747 : c'était une généralisation, à la vérité facile, d'un théorème de Newton sur le mouvement produit par des forces centrales. Euler et D. Bernoulli avaient déjà rencontré un principe équivalent en 1746, celui de la conservation du mouvement giratoire : sans aucun doute, d'Arcy n'en avait pas eu connaissance.

LA MÉCANIQUE ANALYTIQUE DE LAGRANGE

Si l'étude toujours plus approfondie des problèmes de la philosophie naturelle amenait les géomètres à formuler des principes nouveaux, l'application même de ces prin-



L'OBSERVATOIRE DE PARIS
(Vers 1680.)

cipes était la source de méthodes diverses, souvent laborieuses à l'origine, et alourdies par des considérations superflues, mais qui ne tardaient pas à acquérir, par les efforts des Euler, des Lagrange et des Laplace, un haut degré d'élégance et de précision.

Il était réservé à Lagrange en particulier de réunir et de représenter sous un même point de vue (ce sont ses expressions mêmes) les différents principes trouvés jusqu'alors pour faciliter la solution des questions de mécanique ; d'en montrer la liaison et la dépendance mutuelles ; de réduire la théorie de cette science et l'art de résoudre les problèmes qui s'y rapportent à des formules générales dont le simple développement donne toutes les équations nécessaires pour la solution de chaque problème.

La *Mécanique analytique* est le chef-d'œuvre de Lagrange ; c'est là que brillent au suprême degré ses qualités de méthode, de clarté et d'élégance : Hamilton a pu l'appeler un poème scientifique. Dans cet ouvrage, modèle incomparable de généralité analytique, on ne trouve point de figures : les méthodes qui y sont exposées ne demandent ni constructions ni raisonnements géométriques ou mécaniques, mais seulement des opérations algébriques assujetties à une marche régulière et uniforme. Ici, à la vérité, on pourrait reprocher à Lagrange d'aller au delà du but : est-il souhaitable de masquer si parfaitement la réalité des choses, que le sens de la physique devienne inutile à ceux qui raisonnent sur la mécanique ? Ne risque-t-on pas alors de les voir complètement désarmés devant une question qui ne s'accommodera pas du moule accoutumé, et incapable de discerner les circonstances qui déterminent les phénomènes ? On peut avancer que si ce danger n'a pas été aperçu par Lagrange, c'est que, jugeant des autres par lui-même, il ne pouvait pas les supposer privés d'une qualité qu'il possédait au plus haut degré.

La *Mécanique analytique* a été composée par Lagrange pendant son séjour à Berlin, mais il voulait la publier à Paris ; l'abbé Marie lui trouva un éditeur, et grâce aux soins de son élève Legendre, l'ouvrage parut en 1788. La mort surprit Lagrange avant qu'il eût achevé le manuscrit d'une seconde édition, considérablement augmentée, dont le premier volume date de 1811.

C'est sur le seul principe des vitesses virtuelles que Lagrange fonde la statique, parce que, outre sa simplicité et sa généralité, il a l'avantage précieux et unique de pouvoir se traduire en une formule générale qui renferme tous les problèmes qu'on peut se proposer sur l'équilibre des corps. Lagrange reconnaît que ce principe n'est pas évident par lui-même, et il lui donne pour fondement naturel le principe des poulies, c'est-à-dire la loi d'équilibre des moufles : on peut découvrir

là un cercle vicieux, mais il faut bien admettre en mécanique quelque point de départ expérimental, aussi simple que possible.

Profitant ensuite du principe de d'Alembert, énoncé sous la forme plus simple et pour ainsi dire intuitive qui nous est familière, Lagrange réduit de même la dynamique à une seule formule générale.

Mais il faut encore savoir tirer de ces formules générales tout ce qu'elles comportent, et cette question ne laisse pas de présenter quelques difficultés, surtout quand il s'agit des corps continus, et en particulier des fluides : si Lagrange y réussit avec tant de maîtrise, c'est qu'il est aussi le créateur du calcul des variations, avec lequel celui dont il s'agit ici a une liaison intime et nécessaire. Cette même considération fait naître une analogie remarquable entre les problèmes de la mécanique et ceux *de maximis et minimis* relatifs aux intégrales, et permet de ramener les premiers aux problèmes isopérimétriques sans invoquer la métaphysique. Ne pourrait-on pas ajouter que cette même considération est aussi celle qui a fixé le choix de Lagrange, cherchant un principe unique pour établir toute la mécanique?

Une partie importante de la seconde édition de la *Mécanique analytique* est consacrée à la belle théorie de la variation des constantes en vue surtout de son application à la mécanique céleste : Lagrange venait seulement de lui donner sa forme définitive, en 1808, âgé de plus de soixante-dix ans.

L'importance donnée par Lagrange au principe des vitesses virtuelles devait naturellement susciter de nombreux essais de démonstration : les premiers cahiers du *Journal de l'École polytechnique* contiennent des Mémoires intéressants de Fourier, de Prony, de Poinsot et d'Ampère sur ce sujet.

L'ESSAI SUR LES MACHINES DE CARNOT

Pour terminer cette esquisse bien incomplète du développement de la mécanique pure jusqu'aux premières années du dix-neuvième siècle, il nous reste à signaler un important ouvrage de Lazare-Nicolas-Marguerite Carnot (1754-1823). L'illustre organisateur de la victoire appartient aussi à l'histoire des sciences : élève de Monge à l'école de Mézières, il est avec Monge l'un des créateurs de la géométrie moderne ; membre de l'Institut national en 1796, son opposition au coup d'État de Fructidor lui valut d'être remplacé par Bonaparte ; réélu en 1800, il fut de nouveau rayé de la liste des membres de l'Académie, avec Monge, en 1816.

En 1783, Carnot publiait à Dijon sous le titre d'*Essai sur les machines en général*, un ouvrage très remarquable par la profondeur et l'originalité des idées ; en 1803, sans méconnaître le triomphe de la *Mécanique analytique*, il donnait une seconde

édition fort peu modifiée de son *Essai*, l'appelant maintenant *Principes fondamentaux de l'équilibre et du mouvement*. Pour Carnot, comme pour d'Alembert, la mécanique est la théorie des mouvements, et non celle des forces, et plutôt encore la théorie des lois de la communication des mouvements, qu'il est nécessaire de fonder sur l'expérience. Il remplace les déplacements virtuels par des mouvements finis, qu'il appelle géométriques, comme pouvant être déterminés par la seule géométrie et la considération des liaisons ; puis il étudie les lois générales du choc, énonce le beau théorème relatif aux forces vives perdues qui a gardé son nom, et précise l'application du principe de Maupertuis à ce problème. C'est à la théorie des percussions qu'il ramène ensuite celle du mouvement d'un système changeant par degrés insensibles ; enfin, ne perdant pas de vue le but indiqué par le titre primitif de son ouvrage, il justifie de la façon la plus claire, par la considération du moment d'activité, c'est-à-dire du travail, le principe général qui préside à l'emploi des machines en mouvement : on perd toujours en temps ou en vitesse ce qu'on gagne en force.

II

C'est aux savants français qu'appartient la solution définitive de la plupart des grands problèmes de l'astronomie qui se sont posés au dix-huitième siècle ; avant d'en retracer l'histoire, il est nécessaire de dire d'abord comment se propagèrent en France les théories de Copernic et de Képler, comme nous l'avons déjà fait pour celles de Newton, et de rappeler la part importante que prirent les astronomes français au progrès des observations.

L E SYSTÈME DE COPERNIC L'histoire de l'astronomie moderne commence avec le *De revolutionibus orbium cœlestium* (Nuremberg, 1543), fruit des longues réflexions de l'illustre astronome polonais. Le système de Copernic resta longtemps peu connu ; s'il eut quelques zélés partisans, il rencontra surtout l'indifférence ; il suffisait aux théologiens, aussi bien protestants que catholiques, d'invoquer les textes sacrés pour être dispensés d'y attacher quelque importance, et, aux yeux de Luther, Copernic n'était qu'un fou. Mais peu à peu, avec Képler, avec Galilée surtout, les idées nouvelles se répandirent, et la condamnation de ce dernier en 1633 n'y contribua pas médiocrement.

La question du mouvement de la terre passionna le monde savant ; en France,

on eut la sagesse de ne la traiter que philosophiquement, sans faire intervenir l'autorité. Les champions de Copernic devaient cependant user de prudence, et donner à leurs convictions l'abri d'une apparence dubitative. Descartes, qui avait fondé sur le mouvement de la terre son *Traité du monde*, aima mieux « le supprimer que de le faire paraître estropié » ; plus tard, il comparait la terre au voyageur couché dans un vaisseau, et, par une subtile distinction, disait qu'elle ne se meut pas, mais est entraînée par un tourbillon. En publiant en 1644 la traduction d'un prétendu texte d'Aristarque de Samos, Roberval se couvrait de l'autorité de l'astronome grec pour exposer ses idées (Delambre dit ses rêveries) sur le système du monde, partiellement empruntées à Copernic.

Gassendi, dans son *Institutio astronomica* de 1647, étudie les phénomènes célestes selon les trois systèmes de Ptolémée, de Copernic et de Tycho-Brahé, et, par soumission, donne la palme à Tycho, sans réussir à tromper le lecteur attentif sur ses véritables préférences : on sait que le célèbre astronome danois faisait tourner les planètes autour du soleil, et celui-ci, comme la lune, autour de la terre immobile.

Le très érudit abbé Ismaël Boulliaud (1605-1694), protestant converti, se montre plus franc partisan de Copernic dans son *Philolaus* (1634) et dans son *Astronomia philolaica* (1645).

Le défenseur le plus opiniâtre de l'immobilité de la terre était Jean-Baptiste Morin, professeur au Collège royal, dont nous pourrions dire du bien plus loin ; dès 1631, il avait résolu le fameux problème du mouvement ou du repos de la terre ; dix ans plus tard, il pensait achever la déroute des coperniciens par son nouveau livre, au titre superbe : *Alæ telluris fractæ* ; et comme il était aussi l'auteur de l'*Astro-*



ISMAËL BOULLIAUD
(D'après un portrait de J. Van Schuppen,
gravé par P. Van Schuppen).

logia gallica, il prodiguait à ses ennemis les horoscopes vengeurs, *telum imbellè sine ictu*. Morin et ses pareils prétendaient que la chute des corps ne pouvait se faire dans la verticale si la terre tournait : c'est pour lui montrer son erreur que Gassendi faisait, dans le port de Marseille, l'expérience de la pierre abandonnée du haut d'un mât, sur une galère en mouvement, et retombant au pied du mât.

En 1669 encore, le père jésuite Grandamy tire des propriétés magnétiques de la terre la preuve de son immobilité ; mais la cause est maintenant jugée, et si quelques-uns, même au dix-huitième siècle, s'attardent aux conceptions de Ptolémée et de Tycho, ils ne relèvent plus de l'histoire.

LES LOIS DE KÉPLER Pour rendre compte des mouvements irréguliers du soleil et des planètes, il fallait encore à Copernic les excentriques et les épicycles de Ptolémée, car, pour lui, le mouvement circulaire uniforme conservait son caractère de perfection sacrée. Il était réservé à Képler, gloire de l'Allemagne, de découvrir les véritables lois des mouvements planétaires, comme récompense de ses patientes recherches, si longtemps infructueuses, sur l'orbite de Mars. Il fit connaître les deux premières, celles qui définissent le mouvement elliptique, dans son *Astronomia nova* (Prague, 1609) ; quant à la troisième, la plus belle, puisqu'elle lui donnait, après vingt-cinq ans d'efforts, la clef de l'organisation du système solaire, elle est énoncée dans les *Harmonices mundi libri quinque* (Linz, 1619). Comme le fait observer Laplace, les spéculations des géomètres grecs sur les sections coniques s'étaient enfin montrées utiles.

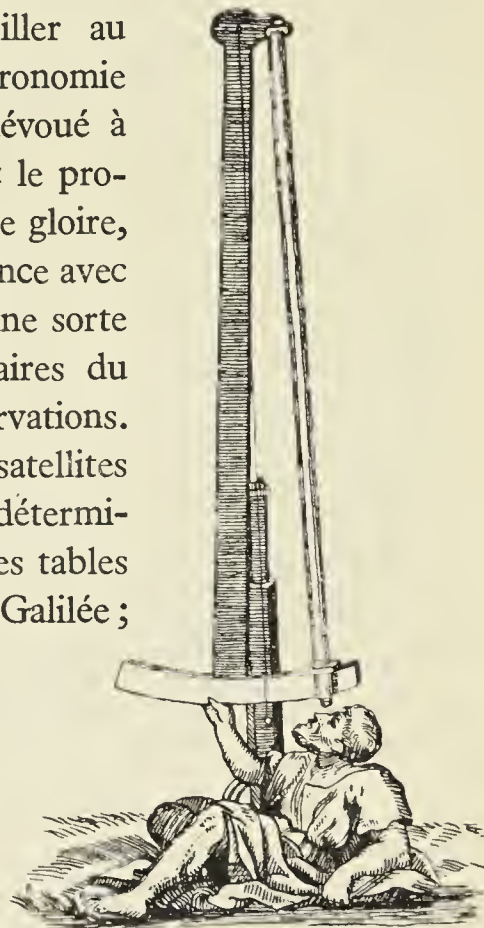
Les lois de Képler devaient conduire Newton à l'attraction universelle. Cependant elles ont été longtemps mal comprises, et, sans les contester absolument, de nombreux astronomes les interprétaient à leur fantaisie. La pierre d'achoppement était l'impossibilité de déterminer géométriquement l'anomalie vraie : aussi Boulliaud, et plus tard Cassini, avec beaucoup d'autres encore, acceptaient de placer le soleil en un foyer de l'orbite, mais, rejetant la loi des aires, attribuaient à la planète un mouvement angulaire uniforme autour du second foyer : c'était l'hypothèse elliptique simple, à peu près acceptable quand l'excentricité est petite, et qu'on se contente d'une faible précision. Pour la corriger, Cassini avait même songé à substituer à l'ellipse une courbe nouvelle qui a gardé son nom. D'autres, comme La Hire, préféraient s'affranchir de toute hypothèse et construire leurs *Tables astronomiques* d'après les seules observations ; Fontenelle applaudissait, disant : « Ainsi l'on ne peut avoir en astronomie rien de plus pur et de plus exempt de tout mélange d'imaginations humaines ! »

LES PREMIERS PROGRÈS DES OBSERVATIONS

C'est à Galilée qu'appartient le mérite d'avoir fait servir les lunettes au progrès, et pour mieux dire au renouvellement de l'astronomie d'observation : leur invention est due sans doute à un Hollandais, vers 1608. Avec une lunette, Galilée découvre les satellites de Jupiter, remarque des singularités dans Saturne, observe les phases de Vénus, les taches du soleil, les accidents de la surface lunaire, etc.

Le plus distingué des astronomes français était alors Nicolas-Claude Fabri de Peiresc (1580-1637), conseiller au Parlement d'Aix, sur cette terre de Provence où l'astronomie avait toujours été en honneur : c'était un homme dévoué à toutes les sciences, méritant d'être appelé par Bayle « le procureur général des lettres » ; sans rechercher sa propre gloire, il entretenait, comme Mersenne, une vaste correspondance avec tous les savants de son temps ; il faisait de sa maison une sorte d'école d'astronomie, spécialement pour les missionnaires du Levant, qui devaient ensuite lui rapporter leurs observations. Dès 1610, Peiresc se procure une lunette, observe les satellites de Jupiter et pense utiliser leurs mouvements à la détermination des longitudes en mer, mais renonce à publier les tables qu'il avait déjà préparées, afin d'en laisser l'honneur à Galilée ; il découvre la nébuleuse d'Orion, et voit les astres en plein jour, bien avant Morin à qui l'on attribue souvent cette découverte ; il entreprend des cartes de la lune ; il répète à Marseille la célèbre observation de Pythéas sur la hauteur du soleil au solstice d'été, pour vérifier l'obliquité de l'écliptique ; il observe les éclipses, les conjonctions des planètes, les étoiles nouvelles, en un mot, tous les phénomènes que peut lui offrir le ciel ; et par son assiduité enthousiaste, il détermine les vocations et fait école. Parmi ses amis et collaborateurs, il faut citer Joseph Gaultier, prieur de la Valette (1564-1647), Boulliaud et surtout Gassendi ; on leur doit à tous d'intéressantes observations : la plus célèbre est celle du passage de Mercure sur le soleil, que fit Gassendi à Paris le 7 novembre 1631, d'après les prédictions de Képler.

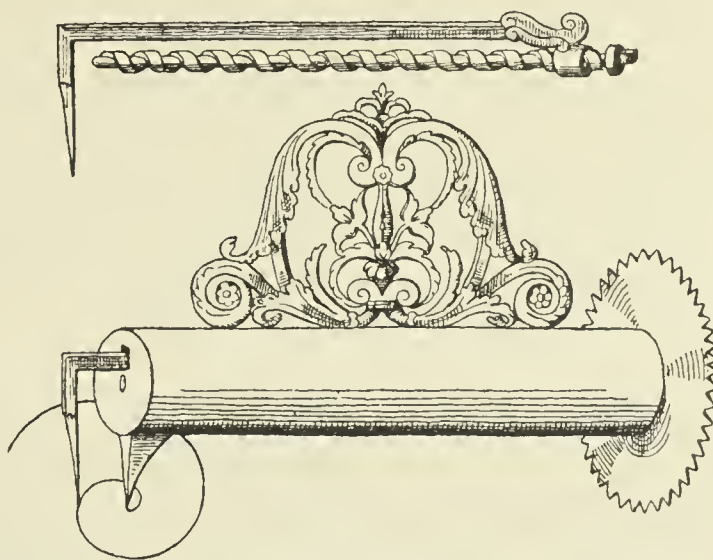
Vers la même époque, Gabriel Mouton, dont nous avons déjà parlé, observait à Lyon les diamètres apparents du soleil et de la lune, et calculait une table des



déclinaisons du soleil. Les savants n'étaient d'ailleurs pas seuls « à faire leur cour à la déesse Uranie » ; Gassendi nous a gardé le nom d'un simple jardinier de Vizille, Elzéar Féronce, qui se livrait avec succès aux observations astronomiques ; et d'autre part, au château de Blois, Gaston d'Orléans attirait les astronomes, qui devaient observer par ses ordres.

Ce que nous venons de dire de Peiresc et de ses contemporains, nous devrions le répéter à la louange de cette nombreuse et magnifique lignée d'observateurs français, qui, ne laissant échapper aucun phénomène céleste, et fixant les positions des étoiles dans des catalogues de plus en plus étendus, ont si puissamment contribué à affermir les fondements de l'astronomie, et permis par là même l'édification des théories les plus délicates de la mécanique céleste : si celle-ci n'est en effet, comme le veut Laplace, qu'un grand problème de mécanique rationnelle, il ne faut pas perdre de vue que sa solution complète, si parfaite soit-elle au regard de la pure analyse, dépend aussi de constantes arbitraires que les observations seules peuvent déterminer.

Pour mieux apprécier les mérites de ces hommes si dévoués, il faudrait pouvoir les étudier de plus près, et montrer toutes les difficultés dont ils ont dû triompher : c'est à peine si nous pourrions en nommer quelques-uns parmi les plus connus jusqu'à la fin du dix-huitième siècle. Le goût de l'astronomie n'était d'ailleurs réservé ni à Paris, ni aux professionnels : on trouve de fervents observateurs dans toutes les parties du royaume et dans toutes les classes de la société, ainsi que nous l'avons déjà vu ; les collèges des Jésuites avaient presque tous un observatoire, et c'est en voyant le père Béraud, son professeur au collège de Lyon, observer la grande éclipse de soleil du 25 juillet 1748, que le jeune Lalande sentit s'affirmer une vocation, éveillée déjà par le magnifique spectacle de la comète de 1744. A Paris même les observatoires étaient nombreux ; en dehors de l'Observatoire royal, dont nous



COMPAS

(D'après le *Theatrum instrumentorum* 1578, de Besson).

aurons bientôt à parler, on pouvait en compter à l'École militaire, à l'hôtel de Cluny, au palais du Luxembourg, au collège Mazarin, à Sainte-Geneviève, au couvent des Capucins de la rue Saint-Honoré, et dans bien d'autres endroits. Notons encore que la cour s'intéressait aux observations, aux éclipses et aux comètes surtout, dont il fallait expliquer la marche au roi : Louis XV en particulier, qui avait reçu les leçons du célèbre géographe Guillaume de l'Isle, aimait à appeler Lemonnier pour les phénomènes rares et importants, et savait ne pas distraire les astronomes dans les moments décisifs : cette faveur était utile à Lemonnier et à l'astronomie. Hors de France, enfin, nos missionnaires et nos voyageurs accumulaient les observations utiles, et en Chine par exemple, le père jésuite Antoine Gaubil (1689-1759), originaire de Gaillac, profitait de la faveur de l'empereur pour étudier l'astronomie chinoise, tandis qu'à Bagdad, de Beauchamp, vicaire général de Babylone, élève et ami de Lalande, faisait bâtir un observatoire en 1786, tout glorieux de ressusciter l'astronomie dans le même endroit où elle avait pris naissance, et où elle avait été déjà renouvelée par les califes arabes.

L'ABBÉ PICARD C'est l'abbé Jean Picard (1620-1682), élève et successeur de Gassendi au Collège royal, qui a, le premier, appliqué *utilement* les lunettes aux instruments divisés ; en même temps, avec son ami et collaborateur Adrien Auzout (1630-1691), il réalisait définitivement le micromètre à fils fixes et mobiles. Ces inventions dont Morin doit être regardé comme le précurseur, jointes à celles des horloges par Huygens, devaient donner aux observations une précision jusqu'alors inconnue, capable de déceler des phénomènes nouveaux. On allait pouvoir étudier les réfractions ; Picard lui-même observait les variations de la hauteur méridienne de la polaire, et constatait qu'elles étaient entièrement contraires à celles qu'on aurait dû attendre de la parallaxe annuelle : un pas de plus, et il découvrait l'aberration de la lumière et la nutation de l'axe terrestre ; mais cet honneur était réservé à Bradley.

Picard est l'auteur de la première mesure de la terre digne de quelque confiance. Pendant les années 1669 et 1670, il établit entre Sourdon, près d'Amiens, et Malvoisine, au sud de Paris, une chaîne de trente-cinq triangles, suivant la méthode de Snellius : la base mesurée directement s'étendait de Villejuif à Juvisy. Lorsque Newton voulut en 1665 calculer la grandeur de la force qui retient la lune dans son orbite, en supposant son identité avec la pesanteur, et en utilisant la mesure de la terre telle qu'on la connaissait alors, il trouva une valeur sensiblement plus grande que celle indiquée par l'observation ; c'est grâce à la nouvelle mesure de Picard,

qu'il put enfin, en 1682, réaliser l'accord entre la nature et sa conception de la pesanteur universelle.

En 1671, Picard partit visiter les ruines d'Uranibourg, le célèbre observatoire de Tycho-Brahé, non loin de Copenhague, afin d'en faire la jonction avec Paris ; il obtint d'Erasmus Bartholin une exacte copie des observations de Tycho, et ramena avec lui Olaus Rømer (1644-1710) qui, admis à l'Académie dès 1672, devait quitter la France en 1681, comme Huygens, et peut-être pour les mêmes raisons. C'est à Paris que Rømer fit sa grande découverte de la vitesse de la lumière ; le 22 novembre 1675, il lut à l'Académie une

dissertation, où il expliquait par le mouvement successif de la lumière les inégalités que l'on observe entre les temps qui séparent les commencements ou les fins des éclipses du premier satellite de Jupiter.

En voulant prouver la propagation instantanée de la lumière, Descartes avait remarqué fort justement que s'il n'en était pas ainsi, jamais nous ne verrions le soleil ni la lune, ni aucun astre dans le lieu qu'il occupe, mais dans le lieu qu'il occupait à l'instant où s'est faite l'émission de la lumière. Delambre pense que cette



D'après une figure de la *Mesure de la terre* de l'abbé Picard. (*Mémoires de l'Académie des sciences*, 1729).

réflexion, considérée plus attentivement, aurait dû hâter les découvertes de Rømer et de Bradley.

Rømer est encore l'inventeur de la lunette méridienne, dont il fit usage après son retour à Copenhague ; il est permis de croire qu'il n'avait fait que perfectionner et réaliser une idée de son maître Picard, qui rencontrait de grandes difficultés dans ses observations méridiennes à l'aide d'un cercle mural.

Nous retrouverons plus loin d'autres initiatives encore à mettre au compte de Picard : c'est un de nos plus grands astronomes, désintéressé aussi, car il usa de son crédit auprès de Colbert pour attirer en France Cassini, sans prendre garde « que celui-ci devait se trouver l'objet de toutes les préférences, qui, en France, sont toujours assurées aux étrangers ».

**L'OBSERVATOIRE
DE PARIS**

En 1664, Auzout se plaignait au Roi « qu'il n'y eût pas à Paris, ni dans tout le royaume, un instrument auquel il voulût s'assurer pour prendre précisément la hauteur du pôle » ; il parlait en réalité de grandes lunettes, et de la manière de s'en servir sans tuyau, qu'il avait inventée. Trente ans plus tôt, Morin, dont les idées étaient souvent bonnes, avait déjà proposé de construire au Mont-Valérien un établissement où l'on aurait fait régulièrement des observations méridiennes, surtout en vue de former des tables plus exactes de la lune.

La requête d'Auzout fut accueillie favorablement par Colbert et Louis XIV ; au solstice d'été de 1667, les mathématiciens de l'Académie orientaient solennellement le nouvel Observatoire royal, *Turris siderum speculatoria* ; les plans de l'édifice, dressés par Claude Perrault, devaient répondre à la magnificence du prince qui le faisait bâtir : on leur a souvent reproché de ne pas répondre aux besoins de l'astronomie.

L'Observatoire complétait l'Académie et en dépendait ; il n'était nullement organisé à la façon d'un établissement moderne, mais servait aux observations des académiciens et de leurs élèves ; il renfermait beaucoup de logements, qui ne restaient jamais vacants, même les plus inconfortables ; la place de directeur ne fut créée qu'en 1771, pour Cassini de Thury ; quant au concierge de l'Observatoire, c'était l'académicien chargé des dépenses d'entretien et de la garde des instruments et machines : Méchain fut le dernier titulaire de cette fonction fort recherchée, établie en 1685.

LES CASSINI

Colbert estimait les astronomes français ; mais ne perdant jamais de vue la gloire du roi, il voulait aussi attirer en France les astronomes les plus marquants d'Europe. Il réussit partiellement avec Huygens, complètement avec Jean-Dominique Cassini (1625-1712), professeur d'astronomie à Bologne, remplissant de hautes fonctions près du pape, célèbre par ses observations et ses publications. Cassini, arrivé à Paris en 1669, sur la recommandation de Picard, devint Français en 1673, et épousa la même année une Française : ses travaux ont incontestablement jeté un grand éclat sur les premières années de l'Académie des sciences.

L'influence de Cassini sur l'astronomie en France a été appréciée de diverses façons, et ce n'est pas chez les secrétaires perpétuels de l'ancienne comme de la nouvelle Académie des sciences qu'il faut chercher un sentiment unanime. Cassini n'a mérité sans doute ni les éloges hyperboliques de Fontenelle, ni les critiques

exaspérées de Delambre. D'après le premier, Dieu lui avait accordé une longue vie tant pour récompenser ses vertus que pour lui donner moyen de perfectionner davantage la géométrie et l'astronomie ; et Lalande enchérit encore, disant que l'astronomie éprouva entre les mains de Cassini une des plus étonnantes révolutions, que ce grand homme fit la principale gloire du règne de Louis XIV dans cette partie, et que son nom est presque synonyme en France de celui de créateur de l'astronomie.

Laissons maintenant parler Delambre : « Nous venons de voir la véritable astronomie établie en France par Picard, transplantée en Danemark par son élève Rømer... Nous allons voir une autre école s'établir à l'Observatoire de Paris. Elle s'y occupera de recherches moins utiles, mais plus brillantes ; elle sera plus protégée, et, sans le vouloir sans doute, elle fera quelque tort à l'astronomie véritable... ; ce qui a fait dire et imprimer, avec beaucoup d'exagération, mais avec une apparence de raison, que cet Observatoire avait toujours été complètement inutile à l'astronomie. »

Cassini a observé le premier la rotation des planètes et la lumière zodiacale ; il a donné d'assez bonnes tables de réfraction, et les lois de la libration de la lune ;



J.-D. CASSINI
(D'après un portrait du temps).

il a publié les premières tables utiles des satellites de Jupiter ; il a découvert successivement, grâce aux grandes lunettes de Campani dont il disposait, quatre nouveaux satellites de Saturne, Japet en 1671, Rhéa en 1672, Téthys et Dioné en 1684. Déjà Huygens avait précisé la figure de l'anneau de Saturne, et découvert Titan en 1655, pensant avoir ainsi complété le système solaire : six planètes et six satellites. En 1672, le nombre des astres errants se trouvait porté à quatorze : c'était faire conspirer le ciel lui-même à la gloire du roi, qui fit frapper une médaille spéciale à cette occasion.

D'autre part, c'est Arago maintenant qui le constate, le chapitre des erreurs de Cassini pourrait être assez étendu : il admirait Descartes et rejetait le mouvement progressif de la lumière, après l'avoir admis un moment ; il semble avoir ignoré Copernic, Képler et Newton ; ses idées sur les comètes étaient absurdes, quoiqu'il sût en tirer parti pour étonner la cour et la ville. On peut dire pour sa défense que, sur tous ces points, il ressemblait à beaucoup de ses contemporains. Mais, précisément, un si grand homme n'aurait-il pas dû se montrer plus éclairé ?

Dominique Cassini mourut en 1712, âgé de quatre-vingt-sept ans ; son assiduité aux observations lui avait déjà ôté la vue, ce qui le faisait comparer à Galilée et à Tirésias, « qui devint aveugle pour avoir vu quelque secret des Dieux ». Mais, de père en fils, la dynastie des Cassini continua de régner sur l'Observatoire jusqu'à la Révolution : d'abord Jacques Cassini (1677-1756), puis César-François Cassini de Thury (1714-1784), enfin Jacques-Dominique, comte de Cassini (1748-1845), quatrième du nom, qui abandonna dignement sa fonction de directeur en 1793 et manqua périr victime de la Terreur.

En outre, Cassini I^{er} avait fait venir à Paris en 1687 son neveu Jacques-Philippe Maraldi (1665-1729), continué lui-même par son neveu Jean-Dominique Maraldi (1709-1788), l'observateur assidu des satellites de Jupiter.

Nous verrons bientôt que la famille des Cassini a joué un rôle important dans l'histoire de la géodésie française.

LES ASTRONOMES DU DIX-HUITIÈME SIÈCLE Achevons d'abord de présenter les principales figures d'astronomes observateurs au dix-huitième siècle, mais en nous réservant, comme pour les Cassini, de les préciser par la suite.

Le chevalier de Louville (1671-1732) affirma l'un des premiers la diminution séculaire de l'obliquité de l'écliptique, après avoir comparé ses propres observations à Marseille avec celles de Pythéas.

Joseph-Nicolas Delisle (1686-1768), le frère du grand géographe, appelé en Russie pour y fonder un observatoire et une école d'astronomie à côté de la nouvelle Académie de Saint-Petersbourg, y resta de 1725 à 1747 ; professeur ensuite au Collège royal, il eut pour élèves Lalande et Messier.

Le savant jésuite Esprit Pézenas (1692-1776), après avoir dirigé l'observatoire de Marseille, se retira à Avignon, lors de la suppression de son ordre ; son *Astronomie des marins* était destinée à remplacer le détestable *Traité d'astronomie nautique* de Maupertuis.

Comme Pézenas à Marseille, Augustin Darquier (1718-1802) observait à Toulouse avec assiduité, fixant son attention surtout sur Mercure.

On doit à Pierre-Charles Lemonnier (1715-1799) un grand nombre de travaux importants : par ses observations, il est de l'école de Picard ; par ses livres, il est de l'école de Greenwich, et, ajoute encore Delambre, il a toujours été un peu en arrière de son siècle. Traducteur des ouvrages de Keill et de Halley, il a fait connaître aussi les découvertes de Bradley.

L'abbé Nicolas-Louis de Lacaille (1713-1762) est le meilleur astronome de son époque ; observateur adroit, scrupuleux et intrépide, c'était en même temps un calculateur habile et sûr ; sa modestie sincère et son désintéressement excitaient l'admiration. Professeur au collège Mazarin, il publia, nous l'avons déjà vu, de nombreux ouvrages d'enseignement très appréciés. Il profita de son voyage au Cap pour mesurer un arc de méridien, et pour déterminer les positions de dix mille trente-cinq étoiles, formant le *Cælum australe stelliferum*, publié après sa mort en 1763 par son ami J.-D. Maraldi. Il a donné d'autres catalogues encore, et d'excellentes tables du soleil, qui tenaient compte pour la première fois des perturbations, suivant les formules de Clairaut.

La *Cométographie* ou *Traité historique et théorique des comètes*, du chanoine géno-véfain Alexandre-Guy Pingré (1711-1796), est un bon ouvrage où l'on trouve tout ce que l'on savait alors (1783) sur les comètes et les moyens de déterminer leurs orbites. Lacaille et Pingré ont calculé, pour l'*Art de vérifier les dates*, toutes les éclipses pouvant intéresser l'histoire depuis dix siècles avant notre ère jusqu'en 1900.

Achille-Pierre Dionis du Séjour (1734-1794), conseiller au parlement, député de la noblesse à l'Assemblée constituante, s'est aussi occupé des comètes, et a publié un intéressant *Traité analytique des mouvements apparents des corps célestes*.

Jean-Sylvain Bailly (1736-1793), le célèbre maire de Paris, malheureuse et héroïque victime des passions révolutionnaires, était élève de Lacaille et de Clairaut ; on lui doit une *Histoire de l'astronomie ancienne et moderne*, complétée par une *Histoire*

de l'astronomie indienne et orientale : le style en est boursoufflé, plus encore que ne l'exige l'époque, et les hypothèses fragiles y abondent. Dans un *Essai sur la théorie des satellites de Jupiter*, Bailly a voulu transporter à ces astres la théorie de la lune de Clairaut : cette analyse était insuffisante, comme le fit voir Lagrange.

Pierre-François-André Méchain (1744-1804) et Charles Messier (1730-1817) cherchaient et découvraient des comètes ; Méchain calculait aussi leurs orbites,

mais Messier, le furet des comètes, disait Louis XV, se contentait de l'observation. « Vers la fin du mois de septembre 1793, il découvre une comète dans le Serpente ; les astronomes de Paris étaient alors dispersés ; Saron seul y restait, mais en prison ; Messier lui fait passer ses observations ; Saron les calcule et détermine l'orbite, peu de jours avant l'arrêt odieux et inique qui termina la vie de ce savant et respectable magistrat. » Bochard de Saron (1730-1794), président au parlement de Paris, aimait et protégeait les sciences ; horloger, mécanicien, calculateur, il avait fait imprimer à ses frais le premier ouvrage de Laplace, *Théorie du mouvement et de la figure elliptique des planètes*.



J. DE LALANDE
(D'après une gravure de F. Bonneville),

Joseph-Jérôme Le Français de Lalande (1732-1807), élève de Delisle, puis de Lemonnier et de Lacaille, professeur au Collège de France, directeur de l'Observatoire en 1795, aimait passionnément l'astronomie et lui a rendu les plus grands services ; il savait recruter parmi ses élèves des observateurs et des calculateurs ; il ne cessait d'attirer par tous les moyens l'attention du public sur les phénomènes astronomiques... et sur lui-même, car il était dominé par l'amour de la célébrité, « toile cirée pour les injures, éponge pour les louanges », selon son propre jugement. Travailleur acharné, il voulait le paraître encore plus, et faisait calculer impitoyablement ses proches des deux sexes.

Dans son célèbre *Traité d'astronomie*, comme dans ses Mémoires, il parle de tout, avec érudition et intérêt, mais n'approfondit rien.

Sa précieuse *Histoire céleste française* (1801) est le premier des grands catalogues : elle contient les positions de plus de cinquante mille étoiles, observées à l'École militaire par Joseph Lepaute d'Agelet (1751-1788), qui trouva la mort dans l'expédition de La Pérouse, et par Michel Le Français de Lalande (1766-1839), neveu de Jérôme.

La *Connaissance des temps* était une éphéméride annuelle publiée par ordre de l'Académie des sciences ; commencée en 1679, elle s'est toujours continuée sans interruption, mais appartient au Bureau des longitudes depuis la création de cet établissement. Le premier rédacteur fut Picard ; après lui vinrent successivement Jean Lefèvre, ancien tisserand de Lisieux, Jacques Lieutaud, Louis Godin, Maraldi II, Lalande, Sébastien Jeaurat, Méchain et de nouveau Lalande, jusqu'à sa mort. La *Connaissance des temps* doit à Lalande un grand développement, et la forme qu'il lui a donnée a toujours été conservée depuis dans ses traits essentiels. Ajoutons qu'à côté de ces éphémérides officielles, il n'en manquait pas d'autres : les plus connues sont celles de Lacaille et l'*Etat du ciel* de Pingré.

Jean-Baptiste-Joseph Delambre (1749-1822), le premier secrétaire perpétuel pour les sciences mathématiques de la nouvelle Académie des sciences, n'est venu à l'astronomie qu'à l'âge de trente-six ans, entraîné par Lalande. Il connaissait parfaitement les langues anciennes, et son histoire de l'astronomie ancienne, du moyen âge, moderne et du dix-huitième siècle, est un admirable ouvrage d'érudition critique. Il cultivait avec amour la trigonométrie sphérique, et l'enrichit de formules nouvelles, connues quelquefois sous un autre nom, bien à tort. Ses tables astronomiques, calculées d'après les théories de Laplace, en tenant compte de toutes les observations connues, ont été longtemps les meilleures. Il ne fut d'ailleurs pas le seul à aider Laplace pour les calculs immenses qu'exigeait la mise en nombres des théories de la *Mécanique céleste* ; à côté de lui, il faut citer Alexis Bouvard (1767-1843), qui, comme Euler, cessa de calculer en même temps que de vivre, et Jean-Charles Burckardt (1773-1825), qui, avant de devenir Français, avait traduit en allemand les deux premiers volumes de l'immortel ouvrage de Laplace.

LE PROBLÈME DES PARALLAXES En 1671, l'Académie, déjà préoccupée de donner à l'astronomie des bases plus certaines, envoyait l'un de ses membres, Jean Richer (1630-1696), à l'île de Cayenne, pour observer le soleil, la lune, Vénus et Mars alors en opposition ; de la comparaison de ses obser-

ventions avec celles que l'on ferait en France pendant le même temps, on pourrait ensuite conclure les parallaxes de ces astres : on sait l'importance qui s'attache à la détermination de la parallaxe solaire.

Le résultat fut satisfaisant ; Cassini put fixer à 9",5 la parallaxe du soleil ; il tirait d'ailleurs le même nombre de ses seules observations, ce qui est à sa gloire, bien que Delambre ne veuille voir là qu'une heureuse chance.

En 1750, Lacaille partait pour le Cap de Bonne-Espérance, où il devait accumuler pendant quatre ans des observations, toutes fructueuses : c'était le renouvellement de l'expédition de Richer, avec les mêmes buts. Il avait demandé qu'on secondât son entreprise par des observations correspondantes en Europe : grâce à la protection de Lemonnier, le jeune Lalande fut chargé d'aller observer la lune à Berlin, ville située à peu près sur le même méridien que le Cap ; Lalande y retrouva des géomètres et des philosophes français, et se perfectionna dans l'analyse avec Euler ; de ses observations combinées avec celles de Lacaille, résulta une connaissance très exacte de la parallaxe lunaire.

Halley avait montré en 1717 le parti qu'on peut tirer des passages de Vénus pour déterminer la distance du soleil à la terre ; il avait adjuré les astronomes de donner tous leurs soins à l'observation des deux passages du 6 juin 1761 et du 3 juin 1769, qui ne devaient survenir qu'après sa mort. La recommandation de Halley fut suivie avec un plein succès ; à l'approche de ces phénomènes rares, le monde astronomique entra en effervescence ; on se préoccupa de déterminer les endroits les plus favorables à leur observation ; les corps savants et les gouvernements organisèrent à l'envi de nombreuses expéditions.

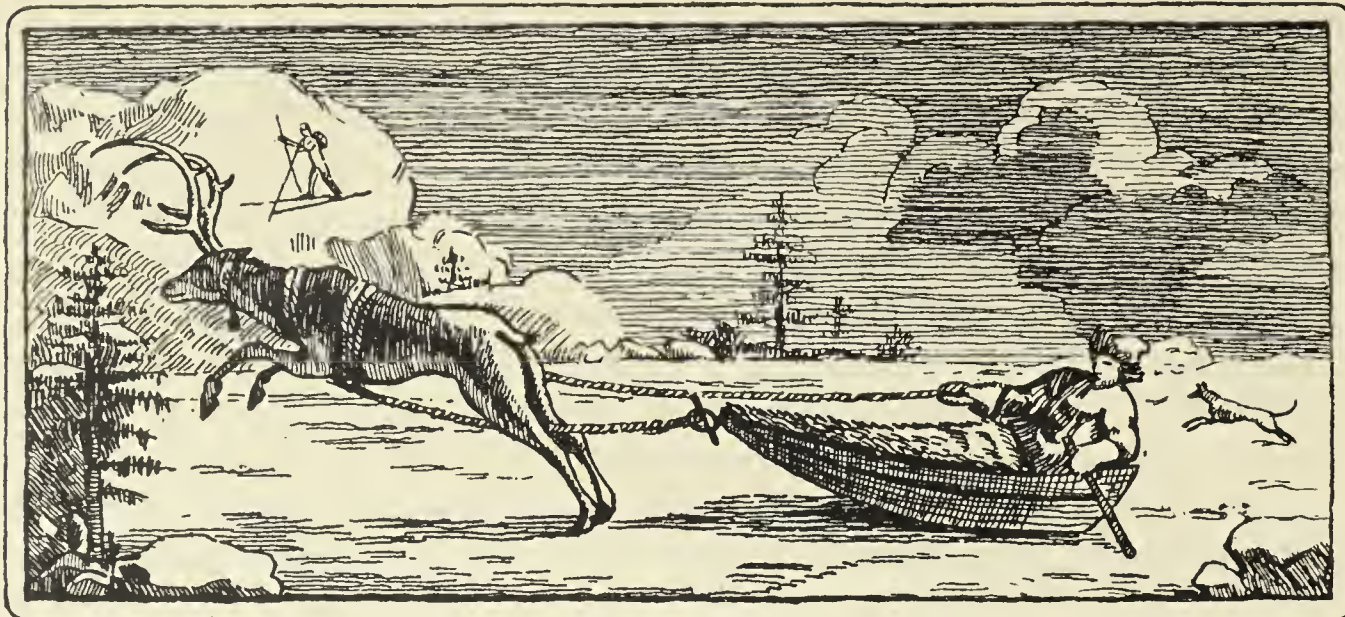
Pingré, l'abbé Jean-Baptiste Chappe d'Hauteroche (1722-1769), et Guillaume Legentil de la Galaisière (1725-1792) furent les missionnaires français. Le premier observa le passage de 1761 à l'île Rodriguez, une des Mascareignes, et celui de 1769, dans de meilleures conditions, avec Fleurieu, au Cap français, dans l'île de Saint-Domingue. Chappe d'Hauteroche fut envoyé à Tobolsk en 1761, en Californie la seconde fois : il y mourut quelques jours après son observation. Quant à Legentil, il avait choisi la station de Pondichéry, mais ne put y aborder, trouvant la place occupée par les Anglais : il vit le phénomène de 1761 en mer, sans pouvoir l'observer ; aussi patient qu'Ulysse, il résolut de rester dans les Indes, où il fit de nombreuses excursions depuis Madagascar jusqu'à Manille, attendant le passage de 1769, que les nuages lui déroberent ; et quand il rentra en France, il trouva ses héritiers en train de partager sa succession.

LA SCIENCE DES LONGITUDES Déterminer la longitude d'un lieu, soit sur terre, soit sur mer, est le plus important des problèmes de la géographie et de la navigation. Presque tous les gouvernements d'Europe avaient affecté des sommes considérables à la récompense de ceux qui trouveraient le moyen de déterminer la longitude en mer, sans que l'erreur dépassât une limite acceptable. Les progrès de l'horlogerie devaient donner la solution immédiate de la question ; mais la pure astronomie fournit aussi des solutions indirectes, fondées principalement sur les observations de la lune, dont le mouvement propre est assez rapide pour qu'elle change sensiblement de place dans un temps assez court. Oronce Fine proposait en 1544 l'observation des passages de la lune au méridien ; en 1634, J.-B. Morin développait brillamment la méthode des distances lunaires telle qu'on l'a employée par la suite. Mais l'on sent que pour donner une valeur pratique à ces spéculations, il aurait fallu des instruments propres à l'observation en mer, et des tables plus exactes du mouvement de la lune : c'est ce que les commissaires nommés par Richelieu pour examiner l'invention de Morin, entre autres Étienne Pascal, Mydorge, Beaugrand, Hérigone, firent observer, avec trop de sévérité peut-être. Après un intervalle de plus de cent ans, Bouguer, Lemonnier, Pingré, Lacaille reprirent la méthode de Morin, et Lalande put donner dans la *Connaissance des temps* les moyens de l'appliquer.

D'autre part, Galilée n'avait pas manqué de voir immédiatement le parti qu'on pouvait tirer des éclipses des satellites de Jupiter pour la détermination des longitudes, et Cassini contribua beaucoup au développement de cette méthode.

LA FIGURE DE LA TERRE Richer avait observé que le pendule qui bat la seconde est plus court à Cayenne qu'à Paris ; de ce fait inattendu, et de sa théorie de la force centrifuge, Huygens conclut que la terre était aplatie vers les pôles ; Newton de son côté arrivait par d'autres considérations au même résultat. Quant aux académiciens de Paris, ils continuaient à regarder la terre comme sphérique, et quand Jacques II, visitant l'Observatoire en 1690, leur fit connaître l'opinion de Newton, ils mirent le phénomène observé par Richer sur le compte de la différence des températures.

En 1691, un savant médecin de Strasbourg, Gaspard Eisenschmidt, fort versé dans les mesures de l'antiquité, prétendit que la terre était un sphéroïde allongé, et cette opinion sembla bientôt confirmée par la mesure de la méridienne française dont nous parlerons plus bas. Deux partis se formèrent : Jacques Cassini et son fils, soutenus par le grand géographe d'Anville, par Jean Bernoulli et tous les cartésiens,



FRONTISPICE DE LA « FIGURE DE LA TERRE, » 1738 (Voyage de Maupertuis en Laponie.)

ne voulaient pas douter que la terre fût allongée ; mais les géomètres et philosophes partisans de Newton contestaient l'exactitude des mesures déjà faites, et ne cessaient d'en réclamer de nouvelles. Un moyen assuré de décider la question, de savoir si le degré du méridien augmentait ou diminuait de l'équateur aux pôles, était d'aller en mesurer un nouveau sous l'équateur. Le projet d'une telle expédition fut agréé par le cardinal de Fleury et Louis XV, grâce à la recommandation du comte de Maurepas : en 1735, Godin, Bouguer et Charles-Marie de La Condamine, accompagnés d'un naturaliste, d'un médecin et d'ingénieurs, s'embarquaient pour le Pérou, où ils devaient mesurer un arc de méridien, et même, primitivement, un arc d'équateur ; mais cette dernière partie du programme fut vite abandonnée. Malgré le précieux concours de deux officiers espagnols, cette mission fut traversée par de nombreux obstacles ; Bouguer revint le premier en 1744 ; La Condamine, entraîné par le goût des voyages et des aventures, traversa le continent sud-américain en descendant le fleuve des Amazones, et ne rentra que plus tard ; quant à Godin, retenu d'abord au Pérou pour enseigner à Lima, il demeura ensuite à Cadix au service du roi d'Espagne.

Cependant, l'Académie était impatiente d'un résultat ; Maupertuis obtint facilement de Maurepas une mission moins lointaine. Accompagné de ses confrères Clairaut, Lemonnier, Camus et de l'abbé Outhier, élève à l'Observatoire, il partit en 1736 pour le cercle polaire, au fond du golfe de Bothnie. Cette expédition fut heureuse et rapide ; dès l'année suivante, la question de la figure de la terre était définitivement tranchée. Maupertuis en recueillit tout l'honneur : il se fit

peindre coiffé d'un bonnet d'ours, aplatisant le globe, et Voltaire écrivit un quatrain à sa louange.

Les mesures du Pérou ne pouvaient que confirmer les conclusions de Maupertuis ; mais Bouguer et La Condamine voulaient passer chacun pour avoir tout fait. En fait, le degré du Pérou était bon, et celui de Laponie beaucoup trop grand.

Cependant, il fallait trouver le défaut des anciennes mesures françaises ; le degré de Picard fut d'abord corrigé, mais cela ne suffisait pas. Cassini de Thury, aidé par Lacaille, entreprit de vérifier les opérations de son père et de son grand-père ; la base mesurée par Picard, que l'on avait toujours admise sans discussion, fut mesurée à nouveau et trouvée plus courte d'une toise pour mille. Mais pouvait-on suspecter l'habileté de Picard ? La vérification fut répétée plusieurs fois, solennellement et de diverses façons : il fallut bien conclure à une erreur. En réalité, la toise de Picard, qui était déjà perdue, était plus courte que celle de Cassini, comme a pu le démontrer Charles Wolf.

Après les expéditions du Nord et du Pérou, l'étude de la figure de la terre tombait dans le domaine de l'analyse : elle allait provoquer une série d'admirables travaux sur l'attraction. Clairaut, le premier, ajoute aux théories de Newton, bientôt suivi par Maclaurin dans sa pièce sur le flux et le reflux de la mer, couronnée par l'Académie de Paris (1740).

En 1743, vint la *Théorie de la figure de la Terre*, chef-d'œuvre de Clairaut, qui, suivant le mot de J. Bertrand, vaut plus à lui seul que l'expédition tout entière à laquelle l'auteur avait pris part.

Les profondes recherches de Clairaut sur la figure d'équilibre d'une masse fluide sphéroïdale, composée de couches de densités et d'ellipticités variables, sont restées la base de toutes les études ultérieures sur le même sujet.

Dans ses *Recherches sur le système du monde* (1754 et 1756), d'Alembert généralise la méthode de Clairaut, qui était limitée aux ellipsoïdes de révolution ; Legendre et Laplace lui donnent encore de nouveaux développements ; enfin, dans les *Mémoires de l'Académie* pour 1782, et plus tard dans la *Mécanique céleste*, Laplace expose la théorie générale des attractions des sphéroïdes, fondée sur les propriétés du potentiel. En donnant pour base à son analyse l'équation qui a gardé son nom, il instituait une méthode entièrement nouvelle, susceptible de s'étendre à tous les problèmes de la physique mathématique, et dont la merveilleuse fécondité allait se manifester d'une façon toujours plus éclatante.

L'ellipticité moyenne de la terre peut se déduire des mesures de la gravité, comme de celles des degrés du méridien : Laplace a montré que l'influence des irrégularités

de la surface et de la matière terrestre rend ces méthodes incertaines, la seconde surtout. Pour trouver une valeur plus précise, il s'est adressé à la théorie de la lune, qui lui avait révélé deux inégalités dues à l'aplatissement de la terre : il ne restait plus qu'à comparer les coefficients de ces inégalités à leurs expressions théoriques, après les avoir déduits des observations.

L A CARTE DE FRANCE

Dans sa lettre au roi, Auzout disait encore qu'il n'y a pas un royaume dans l'Europe dont les cartes géographiques fussent si fautives, et où la situation des lieux fût si incertaine. Dresser une carte de la France était le premier travail qui s'imposait à l'Académie : cette entreprise fut commencée en 1671, mais on n'y mit quelque activité qu'en 1679. Picard et La Hire furent chargés de bien établir d'abord les extrémités de la France, dans tous les sens : ils trouvèrent la Bretagne avancée dans la mer de plus de trente lieues qu'il ne fallait, tandis que la latitude des villes les plus méridionales était trop faible de plus d'un demi-degré : il fallait donc diminuer l'étendue apparente du royaume, mais Louis XIV voulut bien n'en pas tenir rigueur à l'Académie.

Picard fit agréer à Colbert le projet d'une triangulation générale, appuyée sur la méridienne de Paris, prolongée à travers toute la France. Les travaux commencèrent en 1683, La Hire allant jusqu'à Dunkerque, Cassini jusqu'à Bourges ; interrompus par la mort de Colbert, ils furent repris en 1700 par Cassini et son fils, et la méridienne de Paris se trouva prolongée jusqu'au Canigou ; en 1718 Jacques Cassini refit la partie du Nord depuis Montdidier, et publiait en 1720 son *Traité de la grandeur et de la figure de la terre*. Plus tard, il mesurait des arcs de grand cercle perpendiculaires au méridien et des arcs de parallèles, et Cassini de Thury donnait en 1744 la *Méridienne de Paris vérifiée*, dont Lacaille était l'auteur principal.

Le canevas de la carte de France était prêt ; il ne restait plus qu'à le remplir. Le travail commença en 1750, aux frais du gouvernement. Mais en 1756, une nouvelle guerre vint tarir les générosités du Trésor ; avec l'agrément de Louis XV, Cassini de Thury fonda une société commerciale pour continuer l'entreprise : parmi ses cinquante associés, on trouve le duc de Luxembourg, le maréchal de Noailles, Mme de Pompadour et Mme Poisson, Buffon, etc. ; ils devaient verser 1 600 livres annuellement, mais n'en ont fourni que 2 400 une fois pour toutes. Le 21 septembre 1793, un décret de la Convention dépossédait la compagnie présidée par Cassini IV, transportant au dépôt de la guerre les planches et exemplaires de la carte générale de la France, en 173 feuilles (il devait y en avoir 180). Le vœu de Cassini

fut du moins respecté par la postérité : l'œuvre magnifique à laquelle il s'était dévoué après son père et son grand-père continua d'être appelée la *Carte de Cassini*; c'est le premier et parfait modèle de toutes les œuvres semblables en France et à l'étranger.

Cassini de Thury avait la noble ambition d'étendre au reste de l'Europe sa *Description géométrique de la France*; en 1761 et 1762, il fit deux voyages en Allemagne pour prolonger jusqu'à Munich et Vienne l'arc de parallèle qui passe à peu près par Brest et Strasbourg. En 1787, son fils, aidé de Legendre et de Méchain, travaillait à la jonction des observatoires de Paris et Greenwich : on y fit le premier essai du cercle répétiteur de Borda.

L E SYSTÈME MÉTRIQUE DES POIDS ET MESURES L'établissement du système métrique fut l'occasion d'une nouvelle mesure de la méridienne de Paris.

L'idée d'un système de mesures basé sur un prototype invariable « puisé dans le sein même de la nature » n'était pas nouvelle, lorsque, sur la proposition de l'évêque d'Autun, Talleyrand, l'Assemblée nationale, par le décret du 8 mai 1790, demanda au roi la fixation d'une unité naturelle de mesures et de poids, avec le concours du Parlement d'Angleterre et de la Société royale de Londres. Gabriel Mouton avait déjà proposé un système décimal de mesures linéaires, dont l'unité principale était la longueur de l'arc d'une minute sur un grand cercle terrestre; Picard, Huygens, Amontons, Bouguer, La Condamine préconisaient la longueur du pendule à secondes, soit à l'équateur, soit à la latitude moyenne de 45 degrés; Turgot et Necker avaient amorcé l'étude de la question.

Avant d'aboutir à notre système métrique, il fallut beaucoup de commissions, de rapports et de décrets; sans en suivre le détail, rappelons que les mathématiciens Borda, Delambre, Lagrange, Laplace, Monge, Vandermonde, et le représentant Prieur de la Côte-d'Or (ci-devant Prieur-Duvernois) jouèrent un rôle important dans cette histoire. On repoussa le pendule, qui a l'inconvénient de reposer sur l'adoption d'une unité tout à fait arbitraire, la seconde de temps, et de faire intervenir le temps et l'intensité de la pesanteur, notions étrangères à celle de longueur. La dix-millionième partie du quart du méridien terrestre fut donc l'unité fondamentale et, pour l'obtenir avec précision, on décida de mesurer à nouveau la méridienne de France prolongée jusqu'à Barcelone, coupée en deux parties sensiblement égales par le parallèle de 45 degrés. En même temps, l'échelle décimale fut définitivement adoptée, malgré les quelques avantages qu'aurait pu offrir la division duodécimale.

Delambre fut chargé de la partie de la méridienne entre Dunkerque et Rodez,

pendant que Méchain opérerait entre Rodez et Barcelone ; tous les angles devaient être mesurés avec le cercle de Borda. Les travaux, commencés en 1792, entravés plus d'une fois par la répercussion des événements politiques et par des accidents divers, ne prirent fin qu'en 1798 ; ils devaient être sanctionnés par une commission composée de savants français et étrangers ; tous les calculs des triangles furent refaits par Trallès, Van Swinden et Legendre, les deux premiers représentant les républiques helvétique et batave ; il fallut d'ailleurs faire intervenir l'arc du Pérou pour obtenir une valeur admissible de l'aplatissement terrestre. Enfin, les étalons du mètre et du kilogramme furent présentés aux deux conseils des Anciens et des Cinq-Cents par une délégation de l'Institut, et la loi du 19 frimaire an VIII consacra leur adoption définitive.

La division décimale fut étendue à l'angle droit par les promoteurs du nouveau système de poids et mesures : il fallut donc construire de nouvelles tables trigonométriques. Cette mission fut confiée à Gaspard Riche de Prony (1755-1839), qui fit calculer les grandes tables logarithmiques et trigonométriques dites *Tables du cadastre* ; « et comme on voulait donner à tout ce qui était relatif au système métrique français un caractère de grandeur qui excitât l'attention, et une supériorité sur ce qui avait été fait jusqu'alors qui inspirât la confiance, on l'engagea expressément... à en faire le monument de calcul le plus vaste et le plus imposant qui eût été jamais exécuté ou même conçu. » Prony n'y réussit que trop bien : les tables du cadastre, excellentes par ailleurs, ont dû rester manuscrites, en raison de leur volume. Soutenu par Carnot et Prieur, aidé par Legendre, il fit exécuter les calculs préparés, alors qu'ils ne demandaient plus que de simples additions ou soustractions, par une armée d'auxiliaires, la plupart anciens perruquiers que le nouveau régime condamnait au chômage : c'était appliquer le principe de la division du travail. Des tables plus pratiques furent calculées par Borda et publiées par Delambre ; on les trouve aussi dans le célèbre recueil de François Callet.

LA THÉORIE DES MARÉES

En proposant la cause du flux et du reflux de la mer pour le sujet du prix de 1740, l'Académie détermina le premier progrès de la théorie des marées depuis Newton. Daniel Bernoulli, Euler et Maclaurin furent récompensés ; une quatrième pièce, due au jésuite Cavalleri, et fondée sur le système des tourbillons, fut aussi couronnée, grâce à l'influence de Réaumur, Mairan et Pitot : c'était, dit Laplace, le dernier honneur rendu à ce système par l'Académie.

Dans les *Réflexions sur la cause générale des vents*, d'Alembert étudiait les oscil-

lations de l'atmosphère produites par les attractions du soleil et de la lune, mais en se limitant à des hypothèses simples contraires à la nature. La solution générale du problème des marées en tenant compte du mouvement des astres en présence et de la profondeur de la mer, est due à Laplace ; fondée sur le principe de l'extinction des oscillations propres, elle est complète dès 1775. Mais jusqu'à la fin de sa vie, Laplace n'a cessé de la perfectionner, réclamant toujours au port de Brest de nouvelles observations, car, à ses yeux, les formules analytiques n'ont leur pleine valeur que si leurs éléments ont été déterminés par l'expérience.

L'histoire des autres grands problèmes de la mécanique céleste est en tout semblable à celle de la théorie des marées. En les donnant comme sujets de ses prix, l'Académie provoquait les recherches des géomètres les plus distingués de l'époque, toujours les mêmes d'ailleurs, Clairaut, d'Alembert, Euler, Lagrange, et plus ils approchaient du but, plus elle se montrait exigeante, ajoutant des conditions nouvelles et réclamant des éclaircissements. Mais les auteurs, pressés par le temps et entraînés vers d'autres questions, n'ont pas toujours la liberté de mener leurs travaux jusqu'à l'achèvement. Laplace survient alors, qui reprend les questions restées en suspens, ne les quitte pas avant de leur avoir donné une solution complète fondée à la fois sur le calcul et l'observation, et même alors, n'omet aucune occasion d'y ajouter quelque perfectionnement. Poursuivant jusqu'à leurs conséquences les plus délicates les théories nées de la loi de Newton, réduisant tour à tour les phénomènes qui leur semblaient encore rebelles, et dont l'explication paraissait exiger l'intervention de causes étrangères inconnues, il a pu dire à propos de la gravitation universelle : « Tel a été le sort de cette brillante découverte, que chaque difficulté qui s'est élevée est devenue pour elle un sujet de triomphe » ; mais ce triomphe est son œuvre.

Laplace fut de bonne heure en possession de toutes ses découvertes essentielles : cependant le *Traité de mécanique céleste* qui les exposait d'une façon systématique et les complétait, ne commença à paraître qu'en 1799 ; le cinquième et dernier volume est de 1825.

L E PROBLÈME DES TROIS CORPS

Le problème des trois corps entendu dans son sens le plus large, c'est l'étude analytique du mouvement des astres.

Les premières recherches sur ce sujet sont dues à Euler, Clairaut et d'Alembert : elles sont indépendantes, quoique très exactement contemporaines. Les pertur-

bations réciproques de Jupiter et de Saturne, et la théorie du mouvement de la Lune attirée par la Terre et le Soleil en étaient l'occasion. Euler traitait des perturbations de Saturne par l'action de Jupiter dans une pièce couronnée par l'Académie en 1748 ; Clairaut et d'Alembert, à la fin de 1747, faisaient connaître les équations différentielles du mouvement d'un corps attiré par deux autres, et leurs méthodes pour les intégrer dans le cas de la Lune. La grande difficulté était la question des inégalités séculaires : une première approximation ne donnait à Clairaut que la moitié du mouvement observé pour l'apogée de la Lune, ce qui l'amenait à penser que la loi de Newton devait être modifiée, en ajoutant à la force d'attraction un terme inversement proportionnel à une puissance supérieure de la distance. Cette conclusion était confirmée par Euler, trompé par une erreur de signe dans le calcul de la longitude de Saturne ; cependant, elle fut vivement attaquée par Buffon, qui invoquait la simplicité nécessaire des lois primordiales de la nature. « Le métaphysicien eut raison vis-à-vis du géomètre » ; en 1749, Clairaut reconnut qu'il suffisait de pousser plus loin l'approximation pour tirer de l'attraction newtonienne une valeur du mouvement de l'apogée lunaire conforme aux observations. « Alors l'attraction fut rétablie avec honneur dans les espaces célestes, d'où les cartésiens avaient cru un moment la voir bannir ».

Les recherches de Laplace sur le système du monde commencent en 1773 ; elles le conduisent immédiatement au premier énoncé de l'invariabilité des grands axes. C'est en calculant numériquement la variation séculaire du moyen mouvement de Saturne que Laplace fut amené à ce théorème. Quelques années plus tard, en 1776, grâce à sa méthode de la variation des constantes, et à la considération de la fonction perturbatrice, Lagrange put généraliser l'énoncé de Laplace, et lui donner un caractère intuitif.

La théorie générale des inégalités séculaires considérées sous forme périodique, appartient sans doute à Lagrange ; mais Laplace l'a perfectionnée en plus d'un point. C'est à lui que l'on doit en particulier d'avoir montré que les périodes de ces inégalités sont nécessairement réelles, ce qui assure (à ses yeux) la stabilité du système du monde.

La séance du 17 août 1808, au Bureau des longitudes, dut être particulièrement impressionnante : Laplace y donnait les expressions des différentielles des éléments elliptiques à l'aide des différences partielles de la fonction perturbatrice par rapport à ces éléments ; et, le même jour, Lagrange communiquait la très belle analyse qui le menait aux formules inverses, résolues par rapport à ces différences partielles.

Les recherches sur Jupiter et Saturne laissaient encore à désirer l'explication des grandes irrégularités que les observations indiquaient dans le mouvement de ces deux planètes et sur lesquelles Halley avait attiré l'attention. Cette explication fut enfin donné par Laplace en 1784 : le double du moyen mouvement de Jupiter est presque égal à cinq fois celui de Saturne ; de là doit résulter dans la longitude de chacun de ces astres une grande inégalité à très longue période (neuf cent vingt-neuf années), qu'un calcul pénible pouvait seul déterminer ; Laplace l'entreprit, et le succès couronna ses efforts.

Dans sa pièce couronnée en 1766 par l'Académie, Lagrange avait exposé les vrais principes de la théorie des satellites de Jupiter, mais d'une façon encore incomplète ; en 1784, Laplace la reprit, et fit voir que la libration des trois premiers satellites était une conséquence rigoureuse de leurs attractions mutuelles ; plus tard, il lui donna tout le développement dont elle était susceptible, et détermina notamment les circonstances des éclipses.

En s'occupant de cette théorie, Laplace avait reconnu que la variation séculaire de l'excentricité de l'orbite de Jupiter devait produire des équations séculaires dans les moyens mouvements des satellites. Il s'empressa de transporter ce résultat à la Lune, et le 19 novembre 1787, il put enfin annoncer à l'Académie que la question de l'accélération séculaire de la Lune était résolue. Cette accélération avait été soupçonnée par Halley, d'après la comparaison des observations d'éclipses anciennes et modernes ; mais la théorie ne parvenait pas à l'expliquer, même quand on tenait compte de la figure de la Terre, comme le fit Lagrange dans son mémoire couronné pour le prix de 1774. Il semblait donc nécessaire d'invoquer quelque cause étrangère ; l'hypothèse d'une résistance de milieu avait été déjà examinée par Bossut en 1762 ; Laplace la reprit en 1773 et chercha de plus les effets qui pourraient naître d'une transmission successive, et non plus instantanée, de la force de gravitation.

Sa découverte de 1787 assurait le triomphe exclusif de la loi de Newton ; en effet la théorie, confirmée par l'observation, donnait une équation séculaire non seulement au mouvement de la longitude de la Lune, mais aussi à celui du périégée, et cela suffisait à exclure la résistance des milieux éthérés et la propagation successive de l'attraction. De cette découverte résultait encore la constance de la durée du jour, au moins depuis Hipparque.

On sait qu'il faut en rabattre : la théorie de la Lune, dans son plus récent degré de perfection, laisse subsister des divergences avec l'observation. Laplace s'est borné à la première approximation dans le calcul des accélérations séculaires ; si,

mieux instruit par l'aventure de Clairaut, il était allé plus loin, il aurait vu cesser l'accord entre leurs valeurs théoriques et leurs valeurs observées.

LA ROTATION DES CORPS CÉLESTES Nous avons déjà parlé des *Recherches sur la précession des équinoxes* par d'Alembert (1749) ; c'est dans ce remarquable ouvrage que l'on trouve la première étude analytique du mouvement de la Terre autour de son centre de gravité ; Euler et Laplace apportèrent ensuite les compléments nécessaires. En voulant appliquer ses formules de la précession des équinoxes à la libration de la lune, d'Alembert tomba dans de graves erreurs ; la théorie de ce phénomène singulier est due à Lagrange. Il l'a développée en 1764, pour répondre au vœu de l'Académie : « Si l'on peut expliquer par quelque raison physique pourquoi la Lune nous présente toujours la même face ? » C'est dans ce travail que l'on remarque pour la première fois la combinaison du principe des vitesses virtuelles avec celui de d'Alembert, pour établir d'une façon universelle les équations du mouvement d'un système de corps. En 1780, Lagrange compléta son analyse de la façon la plus heureuse.

Dans son *Discours sur la figure des astres*, Maupertuis avait donné une explication ingénieuse du mécanisme par lequel les anneaux de Saturne se maintiennent suspendus autour de la planète, en s'appuyant sur les lois de l'équilibre des fluides ; mais ce n'est qu'en 1787 que Laplace donna une théorie complète de ce phénomène, bientôt confirmée par les observations d'Herschel.

LES COMÈTES L'apparition des comètes a longtemps excité les imaginations, et les idées les plus extravagantes ont été soutenues à leur sujet. En 1773, un mémoire encore inédit de Lalande sur les conséquences du passage d'une comète dans le voisinage de la Terre pouvait provoquer une véritable panique, « et le lieutenant de police lui demanda une explication prompte, capable de rassurer le public » : on peut croire qu'il sut profiter de l'occasion.

Les premières notions exactes sur le mouvement des comètes sont dues à Newton ; grâce à elles, Halley avait pu prédire le retour de sa comète, déjà vue en 1532, en 1617 et en 1682, pour la fin de 1758 ou le commencement de 1759, en priant les astronomes de ne pas oublier que c'était un Anglais qui leur donnait un avis si utile. Appliquant à cette question sa solution du problème des trois corps, Clairaut ne craignit pas d'entreprendre le calcul des perturbations dues à l'attraction de Jupiter et de Saturne ; aidé dans cette tâche immense par Lalande et Mme Le-

paute, il put annoncer à l'Académie que la comète de Halley paraîtrait au commencement de 1759, et qu'elle passerait au périhélie le 13 avril suivant, à un mois près en plus ou en moins : la date véritable se trouva le 12 mars. Cette heureuse prédiction valut à Clairaut une grande renommée et la jalousie de d'Alembert : celui-ci indiqua les moyens d'abrégier les calculs, mais sans en exécuter aucun, car il préférait les recherches purement spéculatives.

En 1780, Lagrange appliquait sa méthode de la variation des constantes au calcul par quadratures mécaniques des perturbations des éléments d'une orbite cométaire ; et plus tard, Laplace établissait la théorie de la capture des comètes, pour expliquer la disparition de la fameuse comète de Lexell, perdue depuis 1770, bien que sa période fût alors moindre que six ans : elle s'était trop rapprochée de Jupiter.

Un autre problème difficile était celui de la détermination de l'orbite d'une comète d'après les observations : Lagrange et Laplace en ont donné des solutions restées classiques. En appliquant sa méthode à la planète Uranus, découverte par Herschel en 1781 et considérée d'abord comme une comète, Laplace trouva quatre paraboles qui satisfaisaient aux premières observations ; mais il fut obligé de les rejeter successivement, et bientôt, avec l'aide du président de Saron, qui avait reconnu le grand éloignement de l'astre, il put déterminer une orbite elliptique.

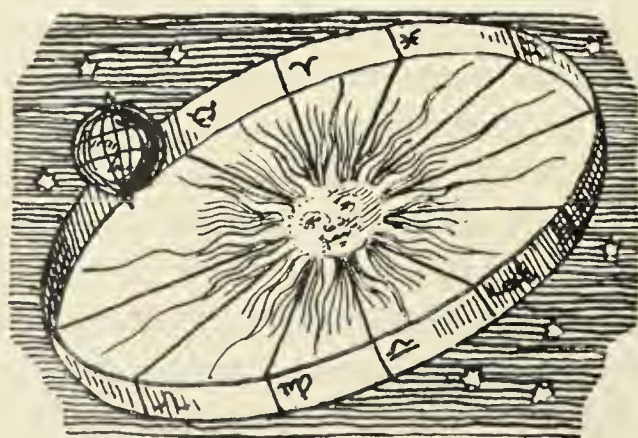
LA COSMOGONIE Les théories de Newton rendaient un compte exact des mouvements célestes, « mais les savants à systèmes demandaient de plus qu'on leur dît pourquoi toutes les planètes tournent d'occident en orient » ; pourquoi les excentricités et les inclinaisons de leurs orbites sont petites, tandis que les comètes décrivent des paraboles inclinées dans tous les sens, etc. Les cartésiens se vantaient de tout expliquer ; les newtoniens étaient plus réservés, et c'est une des causes de la lenteur de leur progrès en France.

Cependant, l'esprit humain veut des explications sur la structure de l'Univers : de là, l'éclosion des théories les plus variées. C'est dans l'*Exposition du système du monde* que Laplace présente en quelques pages finales sa célèbre hypothèse cosmogonique, non sans défiance, car ce n'est pas un résultat de l'observation et du calcul.

Elle est limitée au système solaire, et sans doute Laplace ignorait les travaux antérieurs de Kant, qui avait étendu à l'univers stellaire ses conceptions si souvent inacceptables ; il dit en effet que Buffon est le seul qui ait essayé de remonter à l'origine des planètes et des satellites, en supposant qu'une comète, tombant sur le Soleil, en a chassé un torrent de matière qui s'est réuni au loin, en divers globes

plus ou moins grands et plus ou moins éloignés de cet astre ; ces globes, devenus par leur refroidissement opaques et solides, sont les planètes et leurs satellites.

Mais cette hypothèse n'explique pas les phénomènes dont nous disposons pour remonter à la cause des mouvements primitifs du système planétaire : « Quelle que soit la nature de cette cause, puisqu'elle a produit ou dirigé les mouvements des planètes, il faut qu'elle ait embrassé tous ces corps, et, vu la prodigieuse distance qui les sépare, elle ne peut qu'avoir été un fluide d'une immense étendue. Pour leur avoir donné dans le même sens un mouvement presque circulaire autour du Soleil, il faut que ce fluide ait environné cet astre comme une atmosphère. La considération des mouvements planétaires nous conduit donc à penser qu'en vertu d'une chaleur excessive, l'atmosphère du Soleil s'est primitivement étendue au delà des orbites de toutes les planètes, et qu'elle s'est resserrée successivement jusqu'à ses limites actuelles ». C'est le principe de l'hypothèse de la nébuleuse, trop connue pour que nous poursuivions. On sait les développements qu'elle a pris, les discussions qu'elle a suscitées, les nouvelles théories qu'on a voulu lui substituer ; cependant elle ne heurte aucun principe de mécanique ou de physique, et comme l'affirme H. Poincaré, « malgré les objections qu'on lui a opposées, malgré les découvertes que les astronomes ont faites, et qui auraient bien étonné Laplace, elle est toujours debout ; et c'est encore elle qui rend le mieux compte de bien des faits ; c'est elle qui répond le mieux à la question que s'était posée son auteur : pourquoi l'ordre règne-t-il dans le système solaire, si cet ordre n'est pas dû au hasard ? »





CHAPITRE IV

DE CAUCHY A NOS JOURS

L'Université. L'École polytechnique. Les journaux. — I. Théorie des fonctions. Cauchy. Hermite. Poincaré. — II. Équations et groupes. Galois. — III. Équations différentielles. — IV. Géométrie. Chasles. Poncelet. Darboux. — V. Physique mathématique. Fourier. Lamé. Poisson. — VI. Mécanique, élasticité, mécanique des fluides. — VII. Astronomie. Mécanique céleste. Le Verrier. Géodésie. — VIII. Les tendances contemporaines.



NOUS n'avons point séparé les savants du dix-huitième siècle d'avec ceux du dix-septième : depuis Descartes jusqu'à Laplace, c'est en effet une série continue, avec des tendances analogues qui ne se modifient que progressivement, des moyens d'action semblables, surtout un même genre d'activité. On trouve parmi ces mathématiciens une très grande proportion d'amateurs, chez qui la recherche scientifique est menée de front avec les occupations d'une carrière quelconque ; pendant toute cette période, une place très minime est faite à l'enseignement proprement dit : les savants se soucient peu de former des élèves, de rendre leurs découvertes accessibles à un grand nombre en les exposant dans des cours ou dans des ouvrages didactiques ; ils recherchent surtout l'estime de leurs pairs, communiquant leurs résultats à ces groupements dont l'importance est, de ce chef, prépondérante, les Académies, mais les faisant

connaître peu à peu et souvent d'une façon mystérieuse, comme s'ils craignaient que des rivaux ne s'en emparassent ; enfin l'activité scientifique ne présente en général aucun caractère national : Lagrange et Maupertuis illustrent l'Académie de Berlin tandis que nous accueillons comme nôtres Huygens et Cassini.

Les jeunes mathématiciens français qui, dans les premières années du dix-neuvième siècle, vont commencer à produire, suivront-ils ce mouvement et continueront-ils ces traditions léguées par les siècles précédents ? Non, car lorsqu'ils étaient encore enfants ou adolescents, quelque chose s'est produit qui a entièrement changé les conditions du travail scientifique : la Révolution française.

En dehors d'un accroissement certain du sentiment national, le fait nouveau introduit dans le développement des mathématiques par la Révolution, puis l'Empire, c'est l'organisation de l'enseignement. Dans les universités réglementées, dans les grandes écoles créées, algèbre et géométrie, analyse et mécanique figurent au premier rang parmi les matières traitées ; de sorte que, d'une part, les jeunes gens qui reçoivent ces enseignements se trouvent possesseurs d'une base solide sur laquelle ils pourront édifier par la suite ; et, d'autre part, ceux qui se sentent attirés par la recherche scientifique savent qu'ils peuvent s'orienter vers la carrière du professorat, qui, tout en leur fournissant un moyen d'existence, leur laissera un temps suffisant pour leurs travaux personnels. Il en résulte de profondes différences avec les méthodes des siècles passés : les maîtres font volontiers part à leurs élèves de leurs découvertes et même les y associent ; les communications entre savants sont plus suivies, les travaux de chacun sont bien vite connus de tous ; il n'est pas rare de voir des propositions très nouvelles prendre immédiatement place dans les programmes d'enseignement et figurer dans les traités généraux qui s'éditionnent nombreux ; enfin les foyers principaux sont les universités et les écoles, plus que les Académies qui abandonnent quelque peu leur rôle d'inspiratrices pour se borner à faire connaître, par leurs publications, les conquêtes les plus récentes de la science.

On peut donc presque dire qu'il existe, à partir du dix-neuvième siècle, un véritable métier de mathématicien : et cette circonstance rend très ardue la tâche de l'historien. *Turba magna*, dit M. l'abbé Bremond à propos des mystiques du grand siècle ; et nous pourrions reprendre ces mots dans notre cas. Innombrables sont les géomètres modernes, plus innombrables leurs travaux ; et si l'on veut bien réfléchir au fait que, pour avoir le droit d'enseigner dans une Faculté des sciences, le futur professeur doit présenter une thèse, c'est-à-dire un mémoire original et étendu sur quelque point nouveau, et que cette thèse n'est en général que l'amorce d'autres recherches, on aura tout de suite une idée du nombre des œuvres produites par les

mathématiciens du dix-neuvième siècle. Il est donc impossible de les citer tous : nous chercherons, dans ce qui suit, à insister surtout sur les chefs d'école, les créateurs, les initiateurs — et ils sont nombreux —, ne signalant qu'accessoirement et un peu au hasard les noms de quelques-uns de leurs disciples, avec la certitude d'être fort incomplets, et le désir, non pas de faire une histoire détaillée des mathématiques françaises modernes, qui demanderait d'autres développements, mais de rendre tangibles la part prise par la France dans le mouvement de cette science au dix-neuvième siècle, et la valeur des savants et des œuvres qu'elle a produits.

L'UNIVERSITÉ ET L'ÉCOLE NORMALE Commençons par quelques mots sur ces centres importants d'influence mathématique que sont les universités et les grandes écoles. Nous n'avons pas ici à faire l'histoire de l'enseignement : bornons-nous à signaler le décret du 17 mars 1808 qui fonda l'Université impériale, confiant la direction des études supérieures aux Facultés : la centralisation excessive, écueil de cette organisation, a été diminuée en 1896, lorsque l'autonomie fut rendue aux Universités des départements. Les Facultés des sciences ne sont pas, comme dans certains pays étrangers, de simples prolongements des établissements secondaires, lycées et collèges ; ce sont des centres de haut enseignement, et si les diplômes qu'elles confèrent sont nécessaires aux aspirants aux fonctions professorales, il n'est pas rare de voir leurs cours suivis même par des hommes qui ne poursuivent pas ces titres, et qui n'y viennent que compléter leur instruction personnelle ou chercher de nouveaux sujets de travail.

En même temps que l'Université, le décret de 1808, soucieux d'assurer le recrutement du corps enseignant, instituait l'École normale supérieure, ou plutôt reprenait l'idée émise, on l'a vu, par la Convention. Partagée en deux sections, lettres et sciences, l'École normale a gardé à très peu près la même organisation qu'à ses débuts : ses élèves, peu nombreux, qui se recrutent au concours, suivent actuellement les cours de la Sorbonne, mais reçoivent un important complément d'instruction dans les conférences faites par les maîtres de l'École. L'agrégation, qui donne droit à un poste de l'enseignement secondaire, et, pour les meilleurs d'entre eux, le doctorat, nécessaire pour être nommé dans une Faculté, sont les buts qu'ils poursuivent ; de grandes facilités leur sont accordées pour le travail personnel ; et l'École doit beaucoup, dans cet ordre d'idées, à un de ses directeurs scientifiques, parmi ses anciens élèves celui dont elle est à bon droit le plus fière, Pasteur.

L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE Fondée, à la suite d'un projet déposé par Fourcroy, le 21 ventôse an II (1794), sous le nom d'École centrale des travaux publics, comptant Monge, Lagrange, Prony, parmi ses premiers professeurs, Laplace parmi les membres de son conseil de perfectionnement, l'école qui, réorganisée l'année suivante, prit le titre de Polytechnique, est l'une des créations les plus originales de la Convention. Donner aux élèves, admis par concours, un ensemble de connaissances scientifiques supérieures leur permettant ensuite de suivre avec fruit les cours des écoles d'application qui en feront des ingénieurs ou des officiers d'armes savantes, ce but primitif n'a jamais varié. Par les jeunes gens auxquels elle a donné le goût des mathématiques pures, et qui plus tard sont devenus des savants de premier ordre, « par la science et l'héroïsme des officiers qu'elle a formés », ainsi que s'exprime sa citation à l'ordre de l'armée à la suite de la Grande Guerre, contribuant par là « de la façon la plus glorieuse au succès de nos armes », cette « poule aux œufs d'or » de Napoléon s'est toujours montrée fidèle à sa traditionnelle devise : Pour la Patrie, les sciences et la gloire. Son influence, si importante au point de vue du développement mathématique dans notre pays, ne reste pas limitée à ses seuls élèves : la plupart des cours professés à l'École sont publiés, et prennent place parmi les meilleurs instruments de travail des géomètres français et étrangers : « Ainsi prirent naissance, » dit M. Félix Klein, « toute une série d'admirables traités classiques qui demeurent aujourd'hui encore la base de l'étude mathématique dans toute l'Allemagne », par exemple, pour n'en citer que deux, le cours d'analyse de Camille Jordan et le cours d'astronomie d'Hervé Faye.

AUTRES ÉCOLES Les élèves des Universités, de l'École normale, de l'École polytechnique, ne sont pas en France les seuls à recevoir un enseignement mathématique élevé. Les écoles spéciales, destinées à former des ingénieurs des divers corps de l'État, Mines, Ponts et Chaussées, Génie maritime, par exemple, complètent les connaissances mathématiques de leurs élèves, en insistant sur les branches qui leur seront particulièrement utiles dans leurs recherches techniques ultérieures. L'École centrale des Arts et Manufactures, créée en 1829 par l'initiative privée, donne aux jeunes gens admis à suivre ses cours un enseignement scientifique appliqué à l'industrie, faisant une grande place aux travaux graphiques et aux manipulations. Si l'on y ajoute certains cours du Conservatoire des Arts et Métiers et de quelques autres écoles, on verra la grande part faite, dans notre pays, à l'enseignement supérieur des sciences mathématiques pures et appliquées.

JOURNAUX MATHÉMATIQUES Pour publier leurs travaux, pour se tenir au courant de ceux de leurs confrères, les mathématiciens ont à leur disposition, comme aux siècles précédents, mais sur une plus grande échelle, des journaux variés. Le premier en date après la Révolution semble être le *Journal de l'Ecole polytechnique*, fondé en même temps que l'école, mais qui n'est pas consacré, au moins en principe, aux seules mathématiques. Puis viennent les *Annales* dirigées par Gergonne, qui paraissent à Nîmes de 1810 à 1831, et sont pendant longtemps le seul journal uniquement mathématique; un *Bulletin universel des sciences et de l'industrie*, fondé et dirigé par le baron André-François d'Aubedard de Férussac, voit le jour en 1823 pour mourir lui aussi en 1831. Entre temps, l'Allemagne a pris en 1826 l'initiative, avec Crelle, d'un périodique devenu vite très important, et qui dure encore de nos jours : c'est pour contre-balancer son influence que Joseph Liouville fonde, en 1836, le *Journal de mathématiques pures et appliquées*, « entreprise qu'il appartient », disait-il, « aux géomètres français de faire prospérer », et qui se développe rapidement : un grand nombre de mémoires primordiaux y ont été publiés. Mensuel d'abord, il paraît ensuite chaque trimestre, pour éviter une trop grande fragmentation des textes ; ses directeurs successifs sont, après Liouville, Henri Resal, de 1875 à 1885, puis Camille Jordan jusqu'en 1921, et actuellement M. Henri Villat. La fondation, par Pasteur, en 1864, des *Annales de l'Ecole normale*, ouvre encore un nouveau champ aux publications, d'ailleurs physiques et chimiques aussi bien que mathématiques. Un *Bulletin des sciences mathématiques et astronomiques* est créé en 1870 par Gaston Darboux ; connu bientôt de tous sous le nom de *Bulletin de Darboux*, il donne, avec quelques mémoires peu étendus, de nombreuses analyses d'ouvrages ; il se scinde ultérieurement en deux parties tout à fait distinctes, l'une consacrée uniquement aux mathématiques pures, l'autre à l'astronomie ; à côté de ce *Bulletin astronomique*, publié par l'Observatoire de Paris, les astronomes possèdent encore les *Annales* de divers observatoires, et le tout récent *Journal des Observateurs*, fondé à Marseille par Henry Bourget. La *Société mathématique de France* édite aussi depuis 1872 un important bulletin ; plusieurs articles de mathématiques peuvent être trouvés aussi dans le *Bulletin de la Société philomathique*, publié, avec quelques éclipses, depuis la fondation de cette société en 1788. Enfin les travaux d'un caractère plus élémentaire, et surtout didactique, sont accueillis par les *Nouvelles annales*, que Camille Gérodo et Olry Terquem créent en 1842, et qui viennent d'être reprises, après un arrêt dû à la guerre. Mais un rôle exceptionnel est joué, depuis 1835, par les *Comptes Rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences*, publiés sur l'initiative d'Arago. Les

notes qu'ils contiennent, toutes obligatoirement très courtes, représentent, dans chaque ordre d'idées, la plus récente découverte et le dernier résultat portés ainsi très rapidement à la connaissance du monde entier par les savants de tous pays, avant la publication définitive et forcément tardive de ces travaux dans un des grands périodiques que nous venons de citer.

Il nous avait été possible, dans les chapitres précédents, d'étudier les auteurs les uns après les autres : pareille méthode serait difficile à suivre lorsqu'il s'agit du dix-neuvième siècle : les travaux de chacun sont très variés et dans des domaines fort divers. Ajoutons que la vie des savants, souvent intéressante ou curieuse au dix-septième et au dix-huitième siècle, et mêlée à celle de la société, devient à l'époque moderne, sauf de rares exceptions, singulièrement unie, se passant presque tout entière entre leur cabinet de travail et la Faculté ou l'École où ils enseignent. Pour toutes ces raisons, il sera sans doute préférable de classer ce qui suit par sciences plutôt que par hommes. Nous commencerons par les parties les plus abstraites, l'analyse, « la plus immatérielle, la plus éminemment logique, la seule qui n'emprunte rien aux manifestations des sens », a dit Galois, avec ses branches de la théorie des fonctions, des groupes, des équations différentielles, l'arithmétique supérieure à laquelle le dix-neuvième siècle a fait faire de si grands progrès, puis la géométrie et ses divers points de vue : toutes divisions d'ailleurs artificielles et souvent très vagues ; nous passerons alors à ces sciences où les résultats de l'expérience sont étudiés par les méthodes purement mathématiques, mécanique, physique mathématique, astronomie ; nous aurons ainsi fait le tour de ce monde dont parlait Hermite, dans ces lignes si souvent citées : « Il existe, si je ne me trompe, tout un monde qui est l'ensemble des vérités mathématiques, dans lequel nous n'avons accès que par l'intelligence, comme existe le monde des réalités physiques ; l'un et l'autre indépendants de nous, tous deux de création divine, qui ne semblent distincts qu'à cause de la faiblesse de notre esprit, qui ne sont pour une pensée plus puissante qu'une seule et même chose, et dont la synthèse se révèle partiellement dans cette merveilleuse correspondance entre les mathématiques abstraites d'une part, l'astronomie et toutes les branches de la physique de l'autre ».

I

L ES FONCTIONS DE VARIABLES
IMAGINAIRES. CAUCHY

Si, à la fin du dix-septième siècle, l'introduction des notions de dérivée et d'intégrale a entièrement renouvelé la science mathématique, la considération, au début du dix-neuvième, des fonctions d'une variable imaginaire n'a pas marqué pour l'analyse un progrès moindre. Élargissant l'idée de fonction, augmentant dans des proportions illimitées le nombre jusque-là très restreint des fonctions connues, permettant ainsi l'intégration d'une foule d'équations différentielles nouvelles, le calcul d'une quantité d'intégrales jusque-là irréductibles, la théorie des fonctions d'une variable imaginaire domine les mathématiques modernes, de telle sorte que tous les grands analystes du dix-neuvième siècle, qu'ils soient Français comme Hermite et Poincaré ou Allemands comme Riemann et Weierstrass, ne sont, à des degrés divers, que des continuateurs de l'œuvre immense conçue par un seul homme, Cauchy.

Par suite des événements politiques, la carrière d'Augustin-Louis Cauchy (1789-1857) fut quelque peu mouvementée. Professeur à l'École polytechnique, dont il sortait, puis à la Faculté des sciences et au Collège de France, nommé académicien par décret de 1816, il refusa de prêter serment à la monarchie de Juillet, s'expatria, et accepta une chaire à Turin, rendant à cette ville l'éclat mathématique qu'elle avait connu sous Lagrange. Appelé à Prague par Charles X, qui lui confia l'éducation scientifique du comte de Chambord, il revint en France avec le titre de baron, et, Napoléon III l'ayant dispensé du serment, professa de nouveau à la Faculté des sciences, distribuant d'ailleurs, par principe, tout son traitement aux pauvres de Sceaux, où il résidait. Toujours attaché avec ferveur à la foi catholique, il passa dans le calme et la paix les dernières années de sa vie, cette vie qui fut, d'après un de ses biographes, J. Bertrand, « toujours simple, toujours limpide, toujours désintéressée, toujours sincère et soumise, sans discussion et sans lutte, aux ordres d'une conscience qu'on a comparée, quelquefois en souriant, mais avec admiration, à celle d'un naïf et pieux enfant ».

Des ouvrages importants, plus de sept cents mémoires, des notes que, sous le titre d'*Exercices de mathématiques*, il publiait tous les mois depuis 1826, l'œuvre de Cauchy est immense ; elle remplit, dans l'édition moderne entreprise sous les

auspices de l'Académie des sciences, vingt-sept volumes in-quarto ; elle embrasse toutes les branches des mathématiques ; et Cauchy serait au premier rang des géomètres français, même s'il n'était pas l'auteur de la théorie des fonctions d'une variable imaginaire.

Le dix-huitième siècle n'avait abordé qu'avec beaucoup de timidité la question des imaginaires. En 1797, le Danois Caspar Wessel introduit pour la première fois le diagramme géométrique de la variation d'une quantité complexe : son mémoire passe inaperçu, et le nom du Suisse Argand, qui la retrouve en 1806, reste attaché

à cette représentation. Cauchy, dans une suite de travaux allant de 1825 à 1850, se lance résolument au cœur du problème. Considérant une variable imaginaire, il en définit une fonction par la condition que, comme les fonctions de variables réelles, elle admette une dérivée par rapport à la variable ; il écrit les deux relations fondamentales auxquelles doivent satisfaire les parties réelles et imaginaires de cette fonction ; il introduit la notion d'intégrale d'une telle fonction, et, étudiant la valeur de cette intégrale le long d'un contour fermé, il est conduit à la théorie des *résidus*, éclatant couronnement de ses recherches,



CAUCHY

notion dont on a pu dire que « la science n'a point d'exemple d'une conception plus féconde ». Étendant aux fonctions de variables complexes le développement en série de Taylor, il donne pour la première fois la démonstration rigoureuse de la convergence de cette série. En même temps, il fait connaître de nombreuses propriétés des séries en général, à termes réels ou imaginaires, indique les critères de convergence qui portent son nom, montre qu'on ne peut pas manier sans précautions les séries divergentes, établit des théorèmes sur la multiplication de deux séries, sur les séries doubles, sur les produits infinis, sur les déterminants et les matrices. Dans toutes ces recherches, il fait preuve d'un souci de la précision dans les détails et de la rigueur dans les démonstrations inconnu des siècles précédents : c'est à Cauchy, on peut le dire, que l'on doit les définitions précises et les méthodes rigoureuses de l'analyse moderne. Différentielles, intégrales définies,

limites, convergence, continuité, toutes ces notions jusque-là un peu vagues sont revisées et fixées par lui, de même que sont démontrées avec sûreté certaines propositions sur lesquelles flottait encore quelque incertitude, comme la règle de l'Hôpital, sans parler d'autres théorèmes plus importants dont nous dirons un mot par la suite : car dans toute branche de l'analyse, de la mécanique, de la physique mathématique, nous retrouverons, et au premier plan, le nom de Cauchy.

Les conséquences de l'introduction des fonctions d'une variable complexe — des fonctions *monogènes*, comme les appela Cauchy, — étaient trop vastes pour se trouver épuisées par le travail d'un seul : nombreux seront donc les géomètres, ses successeurs et ses disciples immédiats, qui compléteront et perfectionneront son œuvre. « Science essentiellement française à ses débuts », a-t-on dit de cette théorie : et jamais les mathématiciens français ne s'en désintéresseront. Parmi les élèves de Cauchy, on doit citer en première ligne Victor Puiseux (1820-1883), dont le célèbre *Mémoire sur les fonctions algébriques* met en pleine lumière le rôle fondamental joué, dans toute cette question, par les points critiques d'une fonction. On y trouve pour la première fois la distinction nette entre les diverses espèces de points critiques, les valeurs des intégrales de différentielles algébriques d'après les chemins d'intégration, enfin, suivant le mot d'Hermite, l'idée précise du mode d'existence des fonctions non uniformes. Les travaux de Puiseux peuvent être considérés comme formant le lien entre les principes posés par Cauchy et les développements grandioses qu'en a tirés Riemann.

Bien qu'il n'ait attaché son nom à aucune découverte tout à fait fondamentale (le théorème sur les fonctions entières qu'on lui attribue généralement est déjà dans Cauchy), Joseph Liouville (1807-1882) peut compter parmi les meilleurs disciples du maître. Doué d'une grande puissance de production, — la liste de ses mémoires publiés, de 1836 à 1875, dans le journal qu'il a fondé occupe plus de dix colonnes dans la table des matières, — il a écrit sur de très nombreux sujets, arithmétique, théorie des formes, géométrie, physique mathématique, donnant volontiers à ses exposés la forme d'une correspondance avec un certain M. Besge qui n'était autre que lui-même. On lui doit des études sur les propriétés générales des fonctions monogènes, et surtout la première théorie complète des fonctions elliptiques considérées comme cas particuliers des fonctions d'une variable imaginaire, avec l'application à cette classe de transcendentes des théorèmes de Cauchy.

Il serait injuste d'oublier le nom du commandant du génie Pierre-Alphonse Laurent (1813-1854), à qui l'on doit, pour une fonction monogène, un remarquable développement en série généralisant celui de Cauchy-Taylor.

C'est également aux idées fondamentales de Cauchy que se rattachent des travaux modernes, et même tout à fait contemporains, sur les fonctions entières et sur leur degré possible d'indétermination. A ce sujet, M. Émile Picard a établi une proposition capitale sur les valeurs que prend une fonction uniforme dans le voisinage d'un point singulier essentiel isolé. Il a été suivi dans cette voie par divers mathématiciens français, parmi lesquels MM. Émile Borel, Paul Montel, Gaston Julia. Sans doute est-ce ici aussi qu'il faut placer les recherches, jusqu'à présent uniquement françaises, sur l'itération, avec les noms de S. Lattès, de MM. Gabriel Kœnigs, Leau, Julia, Fatou.

La définition des fonctions monogènes, donnée par Cauchy, faisait intervenir à sa base le concept de dérivabilité : une nouvelle définition, fondée cette fois sur le concept de représentation par des séries entières, fut introduite aux environs de 1870 par Weierstrass en Allemagne, mais simultanément en France par Ch. Méray, doyen de la Faculté des sciences de Dijon : c'est l'extension au domaine complexe de la notion de fonction *analytique* d'une variable réelle, due à Lagrange. Les deux points de vue, monogénéité et analyticité, se rejoignent vite, malgré les différences du début : mais cette seconde façon d'envisager les choses a été le point de départ d'un grand nombre de travaux contemporains sur les séries entières : en particulier, l'étude de ces séries sur leur cercle de convergence est l'objet des recherches remarquables de M. Jacques Hadamard, puis de MM. Leau et Eugène Fabry. Il est important également de savoir par quoi remplacer la série entière quand elle fait défaut : d'où les travaux fondamentaux de M. Paul Painlevé sur certains développements, et de M. Borel sur les séries divergentes sommables.

Quand on s'élève à l'étude des fonctions de deux ou plusieurs variables imaginaires, on se heurte à de très grandes difficultés, d'autant que l'analogie qu'une vue superficielle des choses aurait permis d'espérer, disparaît presque complètement. En particulier, les différences sont profondes dans la théorie des fonctions algébriques, comme l'a montré M.   mile Picard, qui, dans une série de mémoires et dans un ouvrage d'une importance considérable, a posé les principes de la théorie des intégrales de différentielles totales et des intégrales doubles attachées à une surface algébrique. M. E. Picard a été dans ce domaine un chef d'  cole : les savants italiens qui l'ont suivi se sont attachés surtout au côté géométrique de ces questions.

LES FONCTIONS ELLIPTIQUES. HERMITE

Bien que Legendre, comme on l'a vu, ait deviné l'importance des fonctions elliptiques et ait obtenu sur elles quelques résultats fragmentaires, les découvertes primor-

diales dans ce domaine ne sont pas dues à des Français. C'est le génial géomètre norvégien Niels-Henrik Abel (1802-1829), qui, à vingt-quatre ans, en même temps que d'autres propositions qui ont rendu son nom immortel, découvre la propriété « merveilleuse » de la double périodicité ; c'est simultanément Jacobi (1804-1851), qui, à vingt-deux ans, résout le problème de la transformation, si bien que ses titres dans la théorie nouvelle sont équivalents à ceux d'Abel ; c'est Gauss enfin qui, peut-être, était bien avant les deux jeunes gens en possession de l'essentiel sur la question. A ces noms, il faut ajouter celui de Karl Weierstrass, qui, substituant aux fonctions elliptiques primitives d'Abel et Jacobi une transcendante moins compliquée, simplifie notablement les formules et l'appareil analytique de ce qu'on a appelé la trigonométrie elliptique. Mais les mathématiciens français ne pouvaient rester inactifs en face du domaine nouveau, si riche, qui restait à exploiter : Liouville, J.-A. Serret (1819-1885), Émile Mathieu (1835-1890), le père Joubert, entre autres, perfectionnent sur des points divers la théorie générale ; Briot (1817-1882) et Bouquet (1819-1885), deux noms inséparables en mathématiques, après d'importants travaux sur les singularités des fonctions, présentent, dans un traité bien connu et toujours fondamental, une exposition des principes de la théorie des fonctions elliptiques rattachés aux découvertes de Cauchy, à qui, disent-ils, ils veulent rendre la justice qui lui est due ; tandis que plus récemment (1886), un autre ouvrage de fond, malheureusement inachevé, celui d'Halphen, résume l'ensemble de nos connaissances sur les transcendentes en question et sur leurs nombreuses applications, en utilisant de préférence les notations et les vues de Weierstrass. Mais le géomètre qui, en France, incarne pour ainsi dire les fonctions elliptiques, est certainement Charles Hermite (1822-1901), un des plus grands maîtres de la science mathématique dans la seconde moitié du dix-neuvième siècle, dont l'influence sur le développement de la jeune école française a été tout à fait prépondérante.

N'étant encore qu'élève à l'École polytechnique, il envoie à Jacobi deux lettres célèbres, la première sur la division des fonctions abéliennes, la deuxième où il établit pour la première fois des formules, données quinze ans auparavant par son correspondant sans démonstration, relatives à la transformation des fonctions elliptiques. Et toute sa vie, en même temps que d'autres très importants travaux, que nous retrouverons dans diverses branches, mais toujours de mathématiques pures, il ne cesse de perfectionner la théorie de ses fonctions de prédilection. « Je ne puis sortir du domaine elliptique », écrit-il en 1892 ; « là où la chèvre est attachée, il faut qu'elle broute ». Après avoir exposé, d'une façon magistrale, la théorie générale de ces fonctions dans une note au *Traité de calcul différentiel* de Lacroix, il donne

une formule de décomposition en éléments simples à laquelle son nom reste attaché et qui permet l'intégration de toute fonction elliptique ; il met en lumière le lien qui existe entre les fonctions elliptiques et l'arithmétique supérieure ; il montre que ces mêmes fonctions permettent d'intégrer l'équation différentielle dite de Lamé, résultat étendu à toute une classe d'équations à coefficients doublement périodiques par M. Émile Picard ; il applique les fonctions qu'il manie si bien à la résolution de l'équation générale du cinquième degré, ainsi qu'au traitement de diverses questions mécaniques, mouvement du pendule conique, courbe élastique, rotation d'un solide autour d'un point fixe ; il fait enfin l'étude de plusieurs transcendentes en rapport étroit avec les fonctions elliptiques, comme la fonction modulaire, dont il souligne l'importance en arithmétique, les fonctions hyperelliptiques, dont il recherche les transformations, les fonctions doublement périodiques de deuxième et de troisième espèce, dont il ébauche une théorie complétée plus tard par M. Paul Appell, apportant toujours dans ces travaux le souci de clarté, de simplicité et d'élégance qui caractérise son œuvre entière.

LES FONCTIONS FUCHSIENNES ET LES TRANSCENDANTES ANALOGUES. HENRI POINCARÉ Fonctions hyperelliptiques, fonctions abéliennes, ces transcendentes dont nous rencontrons les noms à propos des recherches d'Hermite, sont le résultat des efforts faits par les mathématiciens, de 1840 à 1880, pour généraliser dans diverses directions les fonctions elliptiques. A côté des fondateurs de ces théories, les Allemands Jacobi, Göpel, Rosenhain, Riemann, viennent se placer, pour la recherche des propriétés de ces fonctions, plusieurs géomètres français : MM. Appell, Cousin, qui étudient les périodes des fonctions abéliennes, M. Picard, qui introduit des fonctions hyperabéliennes et hyperfuchsiennes. Enfin cette classe de fonctions est l'objet de travaux remarquables de Georges Humbert (1859-1921).

La théorie générale des surfaces hyperelliptiques avait été déjà esquissée par M. E. Picard, qui en avait donné les traits fondamentaux : on doit à G. Humbert leur étude approfondie. La considération des fonctions abéliennes singulières lui permet d'énoncer un grand nombre de propriétés nouvelles, particulièrement élégantes quand il s'agit de la célèbre surface de Kummer : c'est une des plus belles parties de l'œuvre de ce mathématicien dont l'enseignement au Collège de France et à l'École polytechnique a été particulièrement brillant, et dont les recherches ont inspiré de très nombreux travaux de l'école italienne.

Mais, pour si intéressant que soit le champ ouvert aux recherches par l'intro-

duction des fonctions hyperelliptiques et abéliennes, le problème auquel elles tentaient de répondre, celui de la généralisation des fonctions elliptiques, ne se trouvait pas résolu de façon entièrement satisfaisante. L'honneur d'avoir découvert les fonctions d'une variable qui, tout en généralisant directement et complètement les fonctions elliptiques, fournissent, comme on l'a dit sans exagération, les clefs du monde algébrique, appartient entièrement, — il ne faut pas se lasser de le répéter en face de certaines assertions venues d'outre-Rhin, — à Henri Poincaré.

« Il était vraiment le cerveau vivant des sciences rationnelles..., le seul homme dont la pensée fût capable de faire tenir en elle toutes les autres pensées, de comprendre jusqu'au fond, et par une sorte de découverte renouvelée, tout ce que la pensée humaine peut aujourd'hui comprendre. » Ces mots d'un de ses confrères, au lendemain de sa mort inattendue (1912), résument l'admiration des milieux scientifiques français et étrangers pour ce savant considéré par tous comme un maître incontesté. Né à Nancy en 1854, entré premier à l'École



HENRI POINCARÉ

polytechnique malgré un zéro de dessin et une inaptitude semblable pour les exercices physiques, Poincaré est mis, à vingt-sept ans, sur les listes de candidature à l'Académie des sciences, y entre à trente-deux ans dans la section de Géométrie, — capable, suivant la remarque de Darboux, de figurer aussi bien dans les quatre autres sections de la division des sciences mathématiques, Mécanique, Astronomie, Géographie et Navigation, Physique, — publie trente volumes et près de cinq cents mémoires, est membre de l'Académie française, de quarante académies ou sociétés savantes de tous les pays, force enfin, par des articles et des ouvrages de philosophie scientifique, rapidement populaires et souvent mal compris, l'admiration du grand public, pour qui il incarne cet être supérieur et distrait qu'est « le mathématicien ».

La découverte des fonctions auxquelles Poincaré, hommage rendu au géomètre allemand Fuchs dont les travaux célèbres lui firent entrevoir la voie à suivre, a donné le nom de fuchsiennes, date des environs de 1881 : elle met son auteur au niveau des plus grandes gloires mathématiques de notre pays, d'un Descartes, d'un Fermat, d'un Cauchy. Ces fonctions, uniformes comme les fonctions elliptiques, se reproduisant quand on effectue sur la variable une substitution linéaire à coefficients quelconques, donnent d'une façon complète la solution de deux problèmes absolument fondamentaux en analyse : l'uniformisation, c'est-à-dire la représentation paramétrique des coordonnées d'un point d'une courbe algébrique quelconque, et l'intégration de toutes les équations différentielles linéaires à coefficients algébriques. « Magnifique couronnement de l'œuvre principale du dix-neuvième siècle », la théorie des fonctions fuchsiennes restera, parmi tant d'autres travaux de premier ordre que nous retrouverons, le titre de gloire le plus éclatant de Poincaré ; c'est en pensant à la simplicité et à la beauté des propositions auxquelles elle conduit qu'il a dû écrire ces lignes souvent reproduites : « Le savant digne de ce nom, le géomètre surtout, éprouve en face de son œuvre la même impression que l'artiste : sa jouissance est aussi grande et de même nature. »

II

L A THÉORIE ÉLÉMENTAIRE DES ÉQUATIONS

L'étude des propriétés générales des racines des équations algébriques a toujours été une des préoccupations dominantes des mathématiciens, et nous avons vu sur ce sujet les recherches de Descartes, puis de Rolle, aboutissant aux théorèmes que l'on sait. L'œuvre du dix-neuvième siècle, et particulièrement de la France, dans ce domaine est considérable. Dès 1787, un théorème remarquable, perfectionnant celui de Descartes, est donné par Fourier, bien qu'on l'ait souvent attribué à un médecin appelé Budan de Bois-Laurent ; mais la priorité de Fourier — sur les travaux duquel nous nous étendrons plus tard — est à présent établie sans doute possible. Enfin le pas définitif est fait par Charles Sturm, né en 1803 à Genève, alors ville française et chef-lieu du département du Léman, mort en 1855 ; nous ne pouvons mieux faire, pour caractériser le célèbre théorème dont il est l'auteur, que de reproduire les lignes suivantes, dues à Hermite : « Le théorème de Sturm a eu le bonheur de devenir immédiatement classique, et de prendre dans l'enseignement

une place qu'il conservera toujours. Sa démonstration, où n'entrent que les considérations les plus élémentaires, est un rare exemple de simplicité et d'élégance. Elle intéresse et frappe vivement les élèves, en présentant, sous une forme à la fois mystérieuse et facile, la solution de cette question capitale : déterminer le nombre des racines d'une équation qui sont comprises entre des limites données. Au début de leurs études, elle leur permet de goûter le plaisir délicat et élevé que les œuvres du génie n'accordent ordinairement qu'à de grands efforts. »

Théorème de Fourier, théorème de Sturm, comme ceux de leurs prédécesseurs, ne s'appliquent qu'aux racines réelles : c'est à Cauchy que l'on doit une méthode, d'une généralité beaucoup plus grande, pour déterminer le nombre des racines imaginaires d'une équation algébrique dans un contour, l'une des applications les plus éclatantes de la théorie des fonctions monogènes. Mentionnons aussi sur ce sujet d'importants travaux de Laguerre, et la solution par M. Émile Picard du problème de la recherche du nombre des racines d'un nombre quelconque d'équations, satisfaisant à certaines conditions. Mais ne quittons pas Cauchy sans indiquer que ce géomètre a donné une démonstration rigoureuse du célèbre théorème de d'Alembert, ce théorème fondamental de l'algèbre que nous avons rencontré au chapitre II. Depuis d'Alembert, ce théorème avait donné lieu à une abondante littérature, où l'on rencontre les noms d'Euler, d'Argand, surtout de Gauss : la démonstration de Cauchy (la deuxième qu'il ait donnée, car la première présente un point faible) offre vraiment toute la rigueur désirable.

LA THÉORIE DES GROUPES. Les recherches précédentes, malgré leur ÉVARISTE GALOIS intérêt, ne faisaient que perfectionner, toujours dans la même voie, nos connaissances sur les équations : la gloire d'avoir renouvelé complètement cette théorie en l'asseyant sur sa base définitive revient à cet extraordinaire jeune homme que l'on a appelé « l'immortel » Galois. Né à Bourg-la-Reine en 1811, il est refusé à l'École polytechnique, et entre à l'École normale où il se montre aussitôt franchement insupportable, se croyant (non sans raison) supérieur à ses maîtres, et dont il est bientôt renvoyé à la suite d'une lettre aux journaux où il dénonçait « l'esprit réactionnaire » des chefs de l'École. Il se lance alors à corps perdu dans la politique, va d'émeute en émeute, de société secrète en société secrète, jusqu'à aboutir à l'arrestation et à la prison, et, à vingt ans et sept mois, meurt en duel pour une femme qu'il traite d'infâme coquette, écrivant, la nuit précédente, une sorte de testament scientifique fébrile terminé par un poignant : « *Je n'ai pas le temps!* » Mais avant même son entrée à l'École normale, il avait pré-

senté à l'Académie des sciences deux mémoires sur les équations algébriques. Il semble d'ailleurs que le destin se soit complu à s'acharner sur ces mémoires comme sur leur auteur : le géomètre à qui on en confie la lecture (est-ce Fourier, ou Cauchy ?) les perd, et Galois doit les récrire : mais Poisson, qui les examine cette fois, habitué à des travaux d'un autre genre et rebuté par les obscurités de la rédaction, ne les comprend pas ; et il faut, pour les connaître et en apprécier la valeur, attendre leur publication par Liouville dans son journal en 1846.

L'idée fondamentale d'Évariste Galois, celle qui en fait un véritable créateur, c'est le rattachement de la théorie des équations algébriques à celle, ébauchée à la fin du siècle précédent par Lagrange et Vandermonde, et presque entièrement fondée par Cauchy, des *groupes de substitution*. Il montre que le problème de la résolution algébrique d'une équation se ramène à l'étude d'un groupe, et forme le groupe ainsi relié aux équations dont le degré est un nombre premier. Peut-on reprocher son manque de clarté et certaine imprécision dans les démonstrations à ce jeune homme de dix-sept ans, quand on songe au prodigieux génie que révèlent ses découvertes, quand on se souvient que l'illustre géomètre norvégien Sophus Lie n'a pas craint de ranger Galois à côté de Gauss, d'Abel et de Cauchy, parmi les quatre premiers savants du siècle ?

Beaucoup restait à faire pour compléter son œuvre ; et la théorie des groupes a donné lieu à de très importantes recherches, où l'on trouve, en particulier, les noms d'Hermite, de J. A. Serret, de Mathieu, et, par-dessus tout, celui de Camille Jordan, (1838-1922), professeur à l'École polytechnique et au Collège de France, vénéré comme leur doyen par tous les mathématiciens français contemporains, à qui il donnait un rare exemple d'activité infatigable, présentant encore un mémoire original au congrès de Strasbourg en 1920. Poussant jusqu'au bout les idées de Galois, il forme le groupe de résolution des équations de degré quelconque, ce qui lui permet de répondre complètement à ces deux questions jadis posées par Abel : trouver toutes les équations d'un degré déterminé quelconque qui sont résolubles algébriquement, et juger si une équation donnée est résoluble ou non. Ainsi que l'indique la dédicace d'un ouvrage américain publié il y a peu d'années, ce sont les travaux de Jordan qui ont fait de la théorie des groupes « une branche fondamentale des mathématiques », et ont inspiré les nombreuses recherches récentes dans ce domaine. Il serait difficile, en effet, de citer tous les travaux modernes sur la question, ni sur le sujet voisin des groupes continus qui se rattache surtout à l'école de Lie : l'on y rencontre les noms de beaucoup de géomètres français contemporains, parmi lesquels MM. Picard, Vessiot, Drach, Cartan et Maillet.

**L A THÉORIE DES
NOMBRES**

Si, de la théorie des groupes nous passons à celle des nombres, sujet d'ailleurs extrêmement voisin, nous constatons encore la présence de travaux de première importance dus à des mathématiciens français du dix-neuvième siècle. A la suite de Legendre, et à côté des noms tout à fait prépondérants ici de Gauss, de Kronecker, de Dirichlet, d'Eisenstein, de Stephen Smith, vient se placer en particulier celui d'Hermite, dont les recherches d'arithmétique supérieure sont nombreuses et célèbres à juste titre. On a pu dire que son idée fondamentale, l'introduction des variables continues dans la théorie des nombres, avait ouvert dans ce domaine des horizons entièrement nouveaux. Avec les Anglais Cayley et Sylvester, il crée la théorie des invariants et covariants des formes ; et son nom reste attaché à de nombreux points d'arithmétique supérieure. Enfin ces travaux le conduisent à publier, en 1873, un *Mémoire sur la fonction exponentielle*, peut-être l'un des plus beaux qu'il ait écrits, et dans lequel il expose, découverte admirable, la démonstration si longtemps cherchée de la proposition suivante : le nombre que les géomètres désignent par le symbole e , base des logarithmes naturels et nombre le plus important de l'analyse, est transcendant, c'est-à-dire ne peut être racine d'une équation algébrique d'un nombre fini de termes, à coefficients rationnels. C'est en suivant la marche indiquée ainsi par Hermite que le mathématicien allemand Lindemann, neuf ans plus tard, démontrait la transcendance du nombre π , établissant ainsi d'une façon définitive l'impossibilité complète de la quadrature du cercle.

Bien d'autres noms seraient à citer, de géomètres français modernes ayant approfondi à des degrés divers l'arithmétique supérieure et les théories connexes, formes quadratiques, corps de nombres algébriques, idéaux, etc. ; indiquons d'un simple mot les travaux sur ce point de Liouville, de Jordan, de Poincaré, de M. Émile Picard, et de Georges Humbert, qui obtient en 1916 la représentation géométrique des fractions continues.

III

**L ES ÉQUATIONS
DIFFÉRENTIELLES**

Ici encore, dans cette théorie des équations différentielles à laquelle les géomètres français du dix-huitième siècle, Clairaut, d'Alembert, Lagrange, Laplace, ont fait faire de si importants progrès, un nom domine tout le reste, celui de Cauchy, qui donne à la théorie générale un fondement indestructible par la démonstration définitive

de l'existence des intégrales : et l'on devrait même dire les démonstrations, car il en indique cinq, l'une par les séries majorantes, une autre par la variation des constantes, une troisième par la recherche des intégrales premières, une quatrième par des approximations successives, une dernière enfin par l'assimilation des équations différentielles aux équations aux différences finies. Là, comme partout, on retrouve la précision et la rigueur, marque propre du génie de Cauchy.

Dans ce domaine où brillent à l'étranger les noms de Jacobi, de Fuchs, de Lipschitz, de Lie, l'œuvre des savants français est d'ailleurs considérable : en sont une preuve les travaux déjà cités de Poincaré, auxquels s'ajoutent des recherches du même auteur sur les courbes définies par des équations différentielles ; ceux de Briot et Bouquet ; ceux de M. E. Picard qui a su faire de la méthode des approximations successives un instrument de démonstration et de recherche analytique ; les résultats obtenus sur les équations non linéaires du premier ordre par Gaston Darboux, dont le talent n'est pas moindre en analyse qu'en géométrie où nous l'étudierons plus spécialement ; l'extension aux équations linéaires des idées de Galois par M. Émile Picard, qui, bientôt suivi brillamment par M. Vessiot et M. Drach, a ouvert ainsi un chapitre tout nouveau dans la théorie des équations différentielles. Il faut signaler enfin les remarquables études sur les équations à points critiques fixes de M. Painlevé et de ses élèves, parmi lesquels M. René Garnier et le regrettable Pierre Boutroux. Mais il convient de faire une place à part à G. H. Halphen (1844-1889), officier d'artillerie, l'un des plus pénétrants mathématiciens modernes. Dans sa thèse (1878), puis dans un mémoire couronné par l'Académie des sciences en 1880, il forme toutes les équations différentielles inaltérées par une transformation homographique, et, reprenant une idée de Laguerre, met sur pied la théorie complète des *invariants* des équations linéaires ; il peut ainsi reconnaître si une équation différentielle linéaire est susceptible d'être ramenée à certains types connus par un changement de variable et de fonction.

ÉQUATIONS DIFFÉRENTIELLES SPÉCIALES ET FONCTIONS QUI S'Y RATTACHENT

Nombreuses sont les équations différentielles particulières qui ont été l'objet d'études approfondies : nous en avons déjà rencontré des exemples avec les équations à coefficients elliptiques d'Hermite et de M. Picard ; de ces recherches étendues, bornons-nous à citer quelques-unes.

Sturm indique des propriétés générales et fort intéressantes des intégrales d'une

équation linéaire et homogène du second ordre ; Gaston Floquet fait l'étude des équations à coefficients périodiques ; Darboux, dans un mémoire célèbre sur l'approximation des fonctions de grands nombres, donne, entre autres résultats remarquables, diverses propositions sur des fonctions satisfaisant à certaines équations simples ; l'équation hypergéométrique, à laquelle sont attachés les noms de Gauss, Kummer, Riemann, est étudiée systématiquement et généralisée par M. Edouard Goursat ; à propos d'un cas limite de cette équation, Laguerre rencontre d'intéressants développements en fractions continues, et donne, pour la première fois, un exemple de fraction continue convergente déduite d'une série divergente ; dans le même ordre d'idées, on doit citer les travaux de Thomas-Jean Stieltjes (1856-1894), Hollandais naturalisé Français, dont la correspondance mathématique avec Hermite est célèbre ; l'équation différentielle des fonctions de Legendre, et ces polynômes eux-mêmes sont étudiés par divers auteurs, parmi lesquels Olinde Rodrigues, surtout connu comme membre du groupe saint-simonien ; enfin Hermite introduit des polynômes jouissant des propriétés étendues, déduits par différenciation d'une exponentielle ; on doit aussi à ce géomètre des polynômes à deux variables, qui généralisent ceux de Legendre ; ils ont été étudiés ensuite par François Didon (1845-1872) ; puis M. Appell les a rattachés au potentiel dans un espace à quatre dimensions et a défini, à leur occasion, des fonctions hypergéométriques de deux variables : il y a là tout un petit groupe de recherches contemporaines, presque uniquement françaises.

IV

LA GÉOMÉTRIE Entre tant d'autres, les noms de Pascal, de Desargues et de Monge suffisent à rappeler la contribution du dix-septième et du dix-huitième siècle français à la Géométrie. Le dix-neuvième ne laissera pas tomber cette tradition géométrique si ancienne dans notre pays : il donnera même à ces études un nouvel essor et un magnifique développement. Dès son début, apparaissent deux géomètres éminents qui forment le lien entre leur maître Monge et les savants postérieurs : Lazare Carnot, dont la *Géométrie de position* (1803) et l'*Essai sur la théorie des transversales* exercent par la suite une grande influence, et Charles Dupin (1784-1873), qui donne deux ouvrages remarquables : *Développements de géométrie pure* (1813) et *Applications de géométrie et mécanique* (1822) : on y trouve

des notions absolument fondamentales, comme celles de l'indicatrice, des tangentes conjuguées en un point, des lignes asymptotiques, le théorème célèbre sur l'intersection des surfaces formant un système triple orthogonal, la détermination de la surface dont toutes les lignes de courbure sont des cercles, surface qu'il appela *cyclide* et à laquelle la postérité a attaché son nom. Il faut ajouter un autre élève de Monge, Charles-Julien Brianchon (1783-1864), auteur d'études sur les coniques où se rencontre un théorème devenu classique.

On peut alors suivre, pendant tout le dix-neuvième siècle, les deux courants géométriques bien connus : l'un, de géométrie pure ou synthétique, dont Chasles est le plus illustre représentant, qui étudie les figures en elles-mêmes, sans recourir au calcul ; l'autre, de géométrie analytique ou infinitésimale, qui fait appel à l'analyse, déterminant les figures par des coordonnées et les ensembles de figures par des équations : école qui, à la fin du siècle, reconnaissait pour son chef Gaston Darboux. Entre ces deux groupes vint s'en placer un troisième,

d'importance capitale et de création française, avec Poncelet, la géométrie projective. Étudions rapidement les œuvres maîtresses dans ces trois géométries.



LAZARE CARNOT (D'après Boilly).

LA GÉOMÉTRIE PURE. CHASLES

Né en 1793 à Chartres, élève à l'École polytechnique, Michel Chasles délaisse quelque temps la géométrie, qu'il avait commencé d'étudier avec passion, pour devenir agent de change. De mauvaises affaires, une faillite qui le force à s'enfuir en Belgique, le

rendent à la science. En 1834, il obtient un prix de l'Académie de Bruxelles pour son *Aperçu historique sur les méthodes et le développement de la géométrie*, suivi d'un important mémoire sur l'homographie et la dualité ; puis, rentré en France, et titulaire à la Sorbonne d'une chaire créée pour lui, il publie d'abondantes notes et des ouvrages parmi lesquels on peut citer un *Traité de géométrie supérieure*, un *Traité inachevé des sections coniques*, une *Restitution du livre des porismes d'Euclide*, etc. Tandis que d'autres perfectionnent la géométrie analytique, Chasles constitue une doctrine géométrique rivale de l'algèbre. Son œuvre est basée tout entière sur trois notions fondamentales, le rapport anharmonique entre quatre éléments d'une forme simple, la division homographique et les relations d'involution. On lui doit aussi l'introduction du principe des signes, et la considération, encore un peu hésitante, des couples d'éléments imaginaires conjugués. Sur les courbes et surfaces du second ordre, il obtient de remarquables propositions : description des coniques par deux faisceaux projectifs, théorie des quadriques homofocales considérées comme inscrites dans une même développable circonscrite au cercle de l'infini, existence sur l'hyperboloïde à une nappe de deux systèmes de génératrices rectilignes. Par ses ouvrages et son enseignement, il exerce une grande influence : et l'on a pu dire avec raison que tous les géomètres de l'Europe sont disciples de Chasles.



MICHEL CHASLES

L'amiral Jean-Philippe-Ernest de Fauque de Jonquières (1820-1901) est son élève direct. A sa suite, il étudie les involutions d'ordre quelconque sur une droite, les systèmes de courbes vérifiant certaines conditions ; avec lui il est le fondateur de la théorie des caractéristiques : ces travaux, qui se rattachent à la géométrie dite *énumérative*, ont été complétés et souvent rectifiés par Halphen. Dans ce domaine de la géométrie énumérative, exploré par plusieurs savants français, Halphen se place d'ailleurs au premier rang par son célèbre mémoire, couronné par l'Académie de Berlin, où il indique un mode de classification des courbes gauches, donnant, comme exemple prouvant la souplesse de sa méthode, la classification complète des courbes de degré cent vingt.

C'est enfin chez Chasles que l'on trouve les germes de la géométrie *cinématique*, étude purement géométrique du déplacement d'une figure ou d'un corps

solide, constituée plus tard en doctrine autonome par le colonel d'artillerie Amédée Mannheim (1831-1906).

L A GÉOMÉTRIE PROJECTIVE. PONCELET

« La géométrie moderne est née à Saratov ».

C'est en effet dans les prisons de Russie qu'en 1813, un jeune officier français de la Grande Armée, Jean-Victor Poncelet (1788-1867), conçut les idées fondamentales qui font du *Traité des propriétés projectives des figures*, qu'il publia par la suite, l'un des principaux ouvrages du siècle. Introduction de la notion la plus générale de projection centrale (même de projection imaginaire); application systématique du principe de continuité : « Les résultats établis dans une démonstration sont indépendants d'une position accidentelle des éléments de la question »; ces armes nouvelles, habilement maniées par Poncelet, le conduisent à des propositions de premier ordre, telles que : tous les cercles d'un plan passent par les deux ombilics ou points cycliques du plan; deux cercles concentriques sont bitangents en ces points; les coniques ayant un foyer commun ont deux tangentes communes, joignant ce foyer aux ombilics du plan; une quadrique a toujours deux systèmes de génératrices rectilignes, réelles ou imaginaires, et six systèmes de sections circulaires dont deux seulement réels. D'autres idées de Poncelet ne sont pas moins intéressantes : il reconnaît, par exemple, toute la puissance de la méthode des polaires réciproques; il étudie les coniques comme figures homologiques, et, étendant cette conception à l'espace, sous le nom de perspective-relief, considère une quadrique comme perspective-relief d'une sphère. Mais plus encore peut-être que par les résultats immédiats qu'il en a tirés, ce sont les méthodes nouvelles introduites par Poncelet qui en font vraiment un créateur. Rappelons enfin l'étude célèbre qu'il entreprend des polygones inscrits dans une conique et circonscrits à une autre : il démontre qu'il n'en existe pas en général, mais que, s'il en existe un, il y en a une infinité : problème qui, rattaché par Jacobi aux fonctions elliptiques, et type des problèmes dits de *fermeture*, donna lieu par la suite à de nombreux travaux, dont beaucoup dus à des savants français.

« Si nous savons donner à nos pensées une forme projective et dualistique », dit le géomètre allemand Schœnflies, « nous le devons autant à Gergonne qu'à Poncelet. » Jugement exagéré peut-être, car J.-D. Gergonne (1771-1859) n'a guère fait qu'appliquer et perfectionner les idées du maître. Mais certaines de ses innovations ont été heureuses : ainsi c'est lui qui le premier, comprenant la fécondité du principe de dualité : « Tout phénomène de l'étendue présente toujours un double caractère », emploie (dans le journal qu'il avait fondé) le système, tant utilisé depuis, des

doubles colonnes, écrivant la proposition corrélatrice en regard de chaque théorème.

C'est surtout à Edmond Laguerre (1834-1886), géomètre que nous avons déjà rencontré plusieurs fois, qu'il était réservé de compléter sur des points de première importance l'œuvre de Poncelet. Le *Traité des propriétés projectives* ignorait en effet comment pouvait se faire la transformation des propriétés métriques des figures, des relations entre les angles : alors qu'il n'était que candidat à l'École polytechnique, Laguerre indiqua la solution de cette question. Ce fut pour lui le point de départ d'une série de beaux travaux sur l'emploi des imaginaires en géométrie, sujet qu'il traita dans divers mémoires et qu'il exposa en 1870 dans un cours public. On lui doit la représentation d'un point imaginaire par un vecteur, ou, dans l'espace, par un cercle réel parcouru dans un sens déterminé, l'extension de la théorie des foyers à toutes les courbes algébriques planes et sphériques, l'étude des courbes anallagmatiques, enfin la création de la géométrie de *direction*, où, considérant une droite ou un cercle comme la trajectoire qu'un mobile peut parcourir dans deux sens opposés, l'on est conduit à regarder une droite comme formée de deux semi-droites, un cercle de deux cycles, etc.

GÉOMÉTRIE ANALYTIQUE ET INFINITÉSIMALE. DARBOUX Invention purement française, il était naturel que la géométrie analytique attirât les savants français. Et de fait, il n'est peut-être pas au dix-neuvième siècle de branche plus cultivée en France : propriétés générales des courbes et surfaces, étude de courbes ou de surfaces particulières, théorie de la déformation et de la représentation des surfaces, tous ces sujets ont excité l'intérêt de très nombreux mathématiciens. Diverses méthodes peuvent d'ailleurs être suivies, lorsqu'il s'agit d'appliquer à la solution de problèmes géométriques les ressources de l'algèbre et de l'analyse : l'on peut conserver aux axes coordonnés leur importance fondamentale, « s'attachant seulement à bien reconnaître et à mettre en évidence les éléments qui doivent figurer au premier plan » : c'est la voie suivie par G. Lamé pour des recherches entreprises dans un but physique, que nous retrouverons plus tard ; l'appareil analytique qu'elle nécessite est notablement simplifié si l'on emploie, avec Bobillier (1797-1832), la méthode des notations abrégées, consistant à désigner par des abréviations certaines fonctions compliquées des coordonnées sur lesquelles on doit effectuer des opérations répétées ; l'on peut au contraire supprimer pour ainsi dire les axes, et étudier les êtres géométriques d'une façon intrinsèque ; manière de voir reposant sur l'emploi direct des infiniment petits, dont on peut trouver un exposé complet dans le *Traité de calcul différentiel* de Joseph Bertrand (1822-

1900), géomètre qui a laissé, à côté de travaux dans des branches diverses des mathématiques et d'ouvrages didactiques et historiques fort importants, le souvenir d'une précocité merveilleuse, ayant obtenu à l'âge de onze ans l'autorisation de suivre en amateur les cours de l'École polytechnique, et étant entré à cette même école à dix-sept ans, non sans avoir, dans l'intervalle, passé deux baccalauréats, une licence et le doctorat ès sciences.

Entre ces deux méthodes extrêmes vient s'en placer une troisième, peut-être la plus usitée : conserver les axes rectangulaires de la géométrie cartésienne, mais en les rendant mobiles, suivant une loi fixée, le long de la courbe ou sur la surface que l'on veut étudier : procédé d'une souplesse évidente, dit du trièdre mobile ou de la *périmorphie*, ainsi que le baptisa son inventeur, l'ingénieur des ponts et chaussées Albert Ribaucour (1845-1893).

C'est donc avec de telles armes que les géomètres du dix-neuvième siècle se mettront au travail : et, bien qu'il nous soit impossible de les citer tous, les noms que nous allons rencontrer suffiront à montrer la part prépondérante de la France dans le mouvement géométrique moderne. Dans la théorie des courbes gauches, où Monge, avec les propriétés de la normale et du rayon de courbure, Tinseau, avec la considération du plan osculateur, Lancret, avec l'introduction de la torsion, se posent en précurseurs, le pas décisif est fait avec les formules célèbres découvertes indépendamment par Frenet et J.-A. Serret, d'où le nom souvent employé de formules de Serret-Frenet, bien que la priorité de Frenet soit hors de doute. La théorie générale de la courbure des surfaces est l'objet des travaux d'Abel Transon (1805-1876), de l'abbé Aoust ; dans celle de la déformation et de l'application des surfaces l'une sur l'autre, Edmond Bour (1832-1866) donne un théorème classique concernant l'hélicoïde applicable sur une surface de révolution, Ossian Bonnet étudie les surfaces à courbure moyenne constante, les surfaces minima, tandis que les systèmes triples orthogonaux sont considérés en général par Maurice Lévy, et, dans certains de leurs cas particuliers, par Combescure et Ribaucour. Le nom de Georges Humbert reste attaché à des énoncés simples et élégants étendant aux aires sphériques la propriété de l'arc de circonférence capable d'un angle donné. Si de la sphère nous passons aux quadriques, voici Bobillier et Paul Serret ; aux cyclides, Laguerre, Th. Moutard (1827-1901) ; à des surfaces plus compliquées, Fresnel, Cauchy, Combescure pour la surface de l'onde, M. Picard pour la surface de Steiner, mais il faudrait un volume entier pour être à peu près complet sur un tel sujet.

Des travaux personnels de haute importance et des ouvrages de premier ordre font de Gaston Darboux (1842-1917), né à Nîmes, élève de l'École normale, et pen-

dant presque toute sa carrière professeur de géométrie supérieure à la Sorbonne, l'un des plus grands géomètres contemporains : étude des systèmes triples orthogonaux ; découverte (en même temps que Moutard) du remarquable système triple orthogonal formé de surfaces cyclides ; introduction, pour recherches des propriétés générales des cyclides, des coordonnées pentasphériques ; théorie générale des courbes cycliques planes et sphériques : tels sont les sujets des principaux mémoires de Darboux ; trois ouvrages absolument fondamentaux, dont quiconque veut faire de la géométrie doit connaître chaque ligne, ne sont pas son moindre titre de gloire : les quatre volumes des *Leçons sur la théorie générale des surfaces*, « également remarquables par la richesse du fond et la beauté de la forme » ; les *Leçons sur les systèmes triples orthogonaux*, qu'il avait méditées toute sa vie ; enfin les *Leçons de géométrie analytique*, sa dernière œuvre, pleine d'aperçus nouveaux sur les sujets les plus variés. D'autre part, l'un des plus importants travaux de Darboux a trait à l'intégration des équations aux dérivées partielles : conduit à ce problème par la géométrie, il donne, dans ce domaine où depuis Monge et Ampère aucun progrès n'avait été fait, une nouvelle méthode d'intégration très supérieure aux précédentes, se rattachant aux idées de Laplace, et agrandissant dans des proportions considérables le champ des équations intégrables. Son activité est grande, tant en géométrie qu'en analyse, et même ailleurs : doyen de la Faculté des sciences, il prend une part importante à la réorganisation des Universités ; secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences, à la publication des anciens procès-verbaux de l'Académie. Son influence est considérable et ses élèves nombreux : ses travaux sur les équations aux dérivées partielles sont complétés et perfectionnés par M. Goursat, ainsi que par M. Charles Riquier ; son œuvre géométrique est continuée par M. Claude Guichard, auteur de profondes recherches sur les congruences, sur la déformation des quadriques, et par M. Gabriel Kœnigs, qui donne d'importants résultats sur la géométrie réglée et les mécanismes. Il existe aussi des études de Darboux, ainsi que de Poincaré, sur cette toute moderne théorie qu'est la géométrie *non-euclidienne*, créée par le Polonais Lovatchevski et le Hongrois Bolyai.

L A GÉOMÉTRIE Dans cette branche, doctrine autonome qui n'a guère
DE SITUATION de commun que le nom avec l'ordinaire géométrie, et qu'on appelle aussi *Analysis situs*, nous trouvons encore deux noms français prépondérants : c'est tout d'abord Jordan, qui, dans un mémoire célèbre sur les polyèdres, démontre d'une façon claire et élégante le théorème d'Euler sur la relation entre le nombre des faces, des sommets et des arêtes d'un polyèdre, —

proposition entrevue par Descartes, incorrectement démontrée par Euler, établie par Legendre dans un cas particulier, puis abordée sans succès par divers auteurs — et détermine, au point de vue géométrie de situation, les symétries que peuvent présenter les polyèdres. C'est ensuite Poincaré, qui étend le théorème d'Euler aux variétés à un nombre quelconque de dimensions, reprend et précise certaines notions, considérées auparavant par Betti et Riemann, et appelées nombres de Betti, et indique de nouveaux invariants, comme les coefficients de torsion. Ces recherches d'*analysis situs* sont liées à des questions en apparence très différentes, comme la recherche des groupes finis dans le problème de l'intégration des équations différentielles, et les études tout à fait contemporaines sur les ensembles et les fonctions de variables réelles : sujet d'avenir, par conséquent, et où il est bon de remarquer que la plupart des premiers pas importants ont été faits en France. M. Émile Picard a notamment établi de très utiles rapprochements entre la théorie des fonctions algébriques de deux variables et l'*Analysis Situs*, dont a tiré grand parti l'école italienne.

V

L A PHYSIQUE
MATHÉMATIQUE Si, comme nous venons de le voir, les études de géométrie infinitésimale conduisent rapidement au problème de l'intégration des équations aux dérivées partielles, il en est de même de cet ensemble de recherches que l'on réunit, malgré leur diversité, sous le nom de physique mathématique. Ce traitement théorique des questions soulevées par les sciences expérimentales fait en général appel à toutes les ressources les plus élevées des mathématiques : il a même bien souvent été l'occasion pour l'analyse de progrès importants. Dans ce domaine où l'œuvre du dix-neuvième siècle est considérable, la part de la France est étendue : les noms de Fourier et de Poisson, que nous verrons de plus près, sont au premier plan : mais il faut aussi, là comme dans tant d'autres branches, faire une place d'honneur à Cauchy, dont les travaux sur la théorie des ondes, la dispersion, la polarisation de la lumière (complétés ensuite par Briot) sont remarquables ; et se souvenir que, professeur pendant plusieurs années de physique mathématique à la Sorbonne, Poincaré a donné une série fort intéressante d'ouvrages didactiques sur un très grand nombre de chapitres de cette science, capillarité, élasticité, potentiel, tourbillons, théorie électromagnétique de la lumière.

L A THÉORIE DE LA CHALEUR.
FOURIER ET LAMÉ

Jean-Baptiste-Joseph Fourier est né à Auxerre en 1768 ; élève à l'École militaire de cette ville, il prend l'habit bénédictin au monastère de Saint-Benoît-sur-Loire, mais la Révolution l'en chasse avant qu'il ait prononcé ses vœux. Bonaparte l'emmène en Égypte, et c'est lui qui compose l'Introduction générale à la publication des *Travaux de l'Institut égyptien*. Préfet de l'Isère en 1802, il démissionne en 1814, et, jusqu'à sa mort (1830), se consacre à des travaux dont la valeur le fait secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences et membre de l'Académie française. « Donner la théorie mathématique des lois de la propagation de la chaleur, et comparer le résultat de cette théorie à des expériences exactes », telle est la question à laquelle il répond dans de nombreuses notes, puis dans son grand ouvrage publié en 1822, la *Théorie analytique de la chaleur*, dont l'épigraphe empruntée à Platon est : *et ignem regunt numeri*. Voici alors que cette étude le conduit à l'une des plus importantes découvertes mathématiques du siècle, celle des séries procédant suivant les sinus et cosinus d'arcs multiples, auxquelles la postérité a unanimement donné le nom de séries de Fourier. Le problème était ancien : il avait occupé Euler, d'Alembert, Daniel Bernoulli, Lagrange. Fourier est le créateur véritable de ces séries, dont les coefficients s'expriment par des intégrales définies ayant un sens même quand la fonction développée est discontinue. Les démonstrations qu'il donne sont d'ailleurs insuffisantes ; Poisson, Cauchy, ont tenté de les rendre rigoureuses : Dirichlet y est parvenu. Les séries de Fourier, dont la théorie a été complétée et enrichie de nombreux développements, sont maintenant, en analyse comme en physique, un instrument de travail d'une importance capitale : leur auteur a droit à l'une des premières places parmi les géomètres du dix-neuvième siècle. « Je place Fourier à la tête de l'école française de philosophie mathématique, même au-dessus de Lagrange et de Laplace », s'écrit le grand savant anglais Hamilton, avec un enthousiasme qu'il est permis de trouver fort exagéré, mais qui semble caractéristique de l'influence exercée par Fourier sur toute l'école britannique contemporaine.

Si l'étude mathématique de la chaleur, où l'on doit remarquer encore les noms de Liouville et de Duhamel, a conduit Fourier aux séries trigonométriques, elle a été pour Gabriel Lamé (1795-1870) l'occasion de la découverte des coordonnées elliptiques. Cherchant à déterminer les surfaces isothermes dans les solides homogènes, il est amené à définir un point par l'intersection de trois quadriques homofocales, idée féconde qui a rendu possible par la suite une quantité de travaux sur le potentiel, l'équilibre des fluides, l'élasticité. Les fonctions qu'il a également introduites, solutions de l'équation différentielle à laquelle son nom reste attaché, ont

pris aussi une grande importance en analyse et en mécanique, et ont été très étudiées en France comme en Allemagne et en Angleterre : fait qui s'est reproduit pour des fonctions analogues, considérées par Émile Mathieu à propos d'un problème similaire de physique mathématique, et qui ont trouvé des applications en mécanique céleste. Rappelons enfin que Lamé a posé les bases de la *statique graphique*, dans un mémoire écrit en 1826 en collaboration avec Clapeyron, mais resté inaperçu : des travaux ultérieurs du capitaine Michon (1843) et de Maurice Lévy ont contribué à la constitution de cette science en doctrine définitive : et, puisque nous sommes sur ce sujet, n'oublions pas que ces questions de calcul graphique ont toujours préoccupé les Français, depuis Pouchet (1795) qui donne le premier abaque de la multiplication, et Lalanne, celui de l'équation du troisième degré, jusqu'à M. Maurice d'Ocagne qui fonde le calcul *nomographique*.

ÉLECTRICITÉ ET MAGNÉTISME.

POISSON

Les nombreux travaux de Siméon-Denis Poisson (1771-1842), tous de premier ordre, se rapportent à des points divers de physique mathématique. On l'a, avec raison, rapproché de Laplace, « aussi bien par la nature de ses recherches que par son génie analytique » : il en était d'ailleurs l'élève préféré. Attraction, potentiel, mécanique céleste, probabilités, autant de problèmes abordés par Laplace et repris avec grand succès par Poisson. C'est lui, par exemple, qui donne l'équation exacte du potentiel, lorsque le point attiré est à l'intérieur de la masse attirante. Mais c'est surtout en électricité et en magnétisme qu'il est initiateur, posant les principes de la théorie mathématique de l'électrostatique, de la théorie du potentiel magnétique, étudiant la distribution de l'électricité à la surface des corps conducteurs, les propriétés des aimants produits par influence, sans oublier ses travaux sur la capillarité, l'élasticité, et son rôle en mécanique dont nous reparlerons. Il a inspiré beaucoup de recherches ultérieures, comme celles de l'Anglais Green ; et ses mémoires sur le magnétisme ont servi de point de départ à toutes les études pratiques sur le magnétisme des navires. Laplace, Fourier, Poisson, trois grands noms de savants qui, tout en ne considérant les mathématiques pures que comme un instrument et non un but, les ont enrichies de notions fondamentales et ont mis des armes nouvelles entre les mains des analystes.

André Ampère (1775-1836) est connu de tous pour ses découvertes en électricité : et son nom, le plus grand peut-être du siècle dans l'histoire de la physique, semblerait à première vue déplacé dans l'histoire des mathématiques : Ampère eût pu cependant être aussi bon analyste qu'éminent physicien. Il donne de l'électricité

une théorie mathématique, et est ainsi conduit à écrire deux mémoires de grande importance sur l'intégration des équations aux dérivées partielles par une méthode restée célèbre ; il est aussi le premier à étudier d'une façon spéciale les fonctions d'interpolation.

LES ÉQUATIONS DE LA PHYSIQUE MATHÉMATIQUE Les divers problèmes théoriques que peut poser la physique mathématique conduisent tous, comme nous le voyons, à des équations différentielles ou aux dérivées partielles, souvent d'une grande complication. Quelques-unes sont célèbres, comme l'équation des télégraphistes de lord Kelvin, les équations de Maxwell dans la théorie électro-magnétique de la lumière. Un ouvrage contemporain, les *Leçons sur la propagation des ondes*, de M. Jacques Hadamard, contient de très remarquables résultats sur l'intégration des équations de ce genre : le calcul fonctionnel, le calcul des variations, dont relèvent de nombreuses questions de physique mathématique, doivent aussi beaucoup à ce même auteur, qui approfondit les problèmes extrêmement délicats naissant, dans ces théories, des conditions aux limites, problèmes étudiés aussi par M. E. Picard avec ses méthodes d'approximations successives. Mais voici que, là encore, nous retrouvons Poincaré. Son mémoire sur les *Équations de la physique mathématique* est un des plus beaux qu'il ait écrits. Le problème qu'il prend pour point de départ, détermination des harmoniques d'une membrane vibrante, n'avait été encore que partiellement traité : Poincaré le résout pour la première fois dans toute son ampleur. Par là, il ouvre la voie aux recherches récentes sur les équations intégrales et intégral-différentielles, théorie toute moderne, où les principaux résultats ont été établis par MM. Fredholm, Suédois, et Volterra, Italien, et qui, très à la mode, il y a peu d'années, a été l'objet de nombreux travaux, où figurent les noms français d'abord de M. Picard pour son étude des équations intégrales de première espèce, puis de MM. Goursat et Le Roux. Beaucoup d'autres mémoires de Poincaré ont trait à ces équations de la physique mathématique, à celle des ondes hertziennes en particulier, dont il a étudié l'amortissement. Et c'est bien le moment de rappeler, puisque nous disons un mot de ce rôle joué en physique par l'inventeur des fonctions fuchsiennes, que si Henri Becquerel a entrepris les travaux célèbres qui l'ont mené à la découverte de l'uranium et de la radio-activité, c'est, ainsi qu'il l'a toujours dit, à la suite de la lecture d'un article où Poincaré demandait s'il n'existerait pas un lien entre la phosphorescence et les rayons X.

CALCUL DES PRO-
BABILITÉS De cette branche de la physique mathématique, créée par des Français, comme nous l'avons vu, et perfectionnée par Laplace, nos savants du dix-neuvième siècle ne se sont pas désintéressés : et nous retrouvons encore le nom de Poisson, là aussi continuateur de Laplace, qui s'occupe des probabilités en matière de jugements, et énonce la loi dite *des grands nombres*, généralisation des théorèmes de Bernoulli. Sa démonstration est quelque peu inexacte, et ses vues ne paraissent pas avoir été partagées par l'unanimité de ses contemporains : mais les modernes semblent lui rendre justice. Ampère, lui aussi, a traité un problème de probabilités, celui de la ruine des joueurs, dont plus récemment une solution a été indiquée par Eugène Rouché. L'*Exposé de la théorie des chances*, d'Antoine-Augustin Cournot (1801-1877), le *Traité de calcul des probabilités* de Joseph Bertrand sont, dans des genres différents, deux ouvrages importants, tandis que des travaux contemporains, dus à Poincaré et à M. Borel, ont montré que les recherches en question sont toujours en honneur chez nous.

VI

LA MÉCANIQUE AU DIX-
NEUVIÈME SIÈCLE Il ne s'est pas produit en mécanique, pendant le siècle que nous étudions, de révolution comparable à celles de Galois ou de Cauchy en mathématiques pures : les théories générales de cette science venaient d'être amenées par Lagrange à un tel degré de perfection que les recherches ultérieures, très nombreuses du reste, ne porteront guère que sur des points de détail, ou sur des branches spéciales jusqu'alors peu fouillées : quelques théorèmes nouveaux en mécanique rationnelle, des travaux sur les équations générales de la dynamique, des progrès considérables dans l'étude de l'élasticité et du mouvement des fluides, tel est l'apport de la période moderne ; et, dans ces théories, la France entre pour une large part, à côté des noms étrangers fondamentaux de Jacobi, Hertz et Hamilton.

LA MÉCANIQUE
RATIONNELLE C'est Ampère qui a le premier distingué nettement la cinématique de la dynamique, et a montré l'intérêt d'une étude purement géométrique du mouvement ; c'est Chasles qui a introduit dans ce domaine les notions primordiales, comme le centre instantané de rotation (entrevu par Descartes dans le cas particulier de la tangente à la cycloïde),

l'axe instantané de rotation et glissement ; et c'est à Coriolis que l'on doit un théorème célèbre, de toute première importance, sur l'accélération dans un mouvement composé. Citons enfin les travaux de M. Kœnigs et de M. Raoul Bricard sur les systèmes articulés.

Peu de chose à signaler dans la dynamique du point, sauf quelques études sur les forces centrales, une formule indiquée par Binet (1786-1856), et un problème posé par J. Bertrand : trouver les lois de forces centrales faisant décrire au mobile une conique, quelles que soient les conditions initiales ; résolu simultanément par Darboux et Halphen, il répond à une intéressante question de finalité.

La dynamique du corps solide donne lieu au contraire à de remarquables travaux, dont en première ligne ceux de Poincaré. Le problème du mouvement d'un solide mobile autour d'un point fixe avait préoccupé Euler et Lagrange : il est d'une grande difficulté. Se bornant au cas où les forces extérieures ont une résultante passant par le point fixe, Louis Poincaré (1777-1859), qui s'était signalé par la découverte des quatre polyèdres réguliers étoilés déjà pressentis par Képler, donne du mouvement une très élégante représentation géométrique, montrant que l'ellipsoïde d'inertie reste constamment en contact avec un plan fixe, introduisant, sous les noms de *polhodie* et *herpolhodie*, les courbes décrites sur l'ellipsoïde et le plan par le point de contact. La forme indiquée par Poincaré pour l'herpolhodie est d'ailleurs inexacte : cette courbe est sans inflexion, comme le prouvent indépendamment plusieurs auteurs, dont M. le comte Magnus de Sparre. La représentation du mouvement peut être réalisée artificiellement d'une façon tangible : Darboux et M. Kœnigs construisent à cet effet un ingénieux appareil qu'ils appellent *herpolhodographe*. Un autre cas particulier, où les équations du mouvement s'intègrent, celui du corps pesant, avait été étudié par Sophie Kowalewski : les résultats qu'elle obtient ont été complétés par M. Roger Liouville. Mentionnons aussi les travaux de Poisson et de Cournot sur le mouvement d'un solide en contact avec un plan horizontal, et les importantes recherches de M. Painlevé sur le frottement, montrant que les lois généralement admises conduisent souvent à des résultats très singuliers et même à des indéterminations de mouvement.

Dans la dynamique des systèmes, le nom français à retenir est celui de Poisson, qui transforme les équations de Lagrange par un changement de variables, introduit les notations abrégées aujourd'hui appelées *parenthèses de Poisson*, et démontre ce théorème qui faisait l'admiration de Jacobi : si l'on a deux intégrales premières des équations canoniques du mouvement, autres que celle des forces vives, on peut en écrire immédiatement une troisième. Signalons très rapidement des

recherches ayant pour but l'étude théorique de certains problèmes de dynamique pratique : celui de la bille de billard, envisagé par Coriolis ; de la bicyclette, par Carlo Bourlet et M. Boussinesq ; du gyroscope, par Foucault ; la question des modèles réduits de machines, par J. Bertrand et H. Léauté ; et bornons-nous à indiquer d'un mot les très nombreux travaux de balistique dus à des auteurs français, parmi lesquels Hugoniot, Sarrau et beaucoup d'officiers d'artillerie.

N'omettons pas de mentionner aussi les traités didactiques fondamentaux et très répandus, où plusieurs savants français ont exposé l'ensemble de nos connaissances en mécanique : le premier en date au dix-neuvième siècle est celui de Poisson, toujours excellent, et dont Hermite disait en 1890 qu'il n'avait pas encore été surpassé ; puis vient celui de Despeyrous, complété par des notes magistrales de Darboux ; enfin les quatre importants volumes de M. Appell. Poncelet a également publié les cours de mécanique pratique et industrielle qu'il a professés en 1827 à l'École d'application de Metz, puis à partir de 1838 à la Sorbonne.

ÉLASTICITÉ L'étude de l'élasticité est une branche importante de la mécanique : elle est cultivée par de nombreux savants, mais touche de bien près à l'art de l'ingénieur, dont nous n'avons pas à parler ici. Après des recherches concernant divers points particuliers, comme Cauchy pour la vibration d'une tige flexible, Sophie Germain (1776-1831) pour les vibrations des lames élastiques, ou Adhémar Barré de Saint-Venant (1797-1886) pour la flexion d'une poutre droite, Lamé donne une théorie mathématique générale de l'élasticité. D'autres travaux du même genre sont dus à Navier (1785-1836), disciple et ami de Fourier, à Poisson, et plus récemment, à Pierre Duhem, à MM. Boussinesq, Brillouin, Lecornu ; les problèmes de la résistance des matériaux sont abordés avec des méthodes nouvelles par M. Bertrand de Fontviolant ; et l'étude générale des systèmes déformables est poussée très loin par MM. Eugène et François Cosserat.

MÉCANIQUE DES FLUIDES Le sujet est très vaste, et sous ce terme vague de mécanique des fluides, on peut ranger des études de genres assez divers.

a) *Cinématique et dynamique des milieux continus.* On peut en considérer Cauchy comme le fondateur : l'hydraulique et l'hydrodynamique, qui sont des cas particuliers, sont très étudiées chez nous, avec les problèmes de l'écoulement des liquides traités par Navier, la théorie des ondes, dont nous avons dit un mot à propos du livre de M. Hadamard, et qui a donné lieu à des travaux célèbres d'Hugoniot, la

théorie des tourbillons, abordée par Poincaré ; parmi les recherches générales, celles de Duhem, donnant une base nouvelle à l'hydrodynamique, de Boulanger, de M. Brillouin, très récemment celles de M. Henri Villat, sont les plus dignes de remarque : mais le nom fondamental est ici celui de M. Boussinesq, dont on a pu dire qu'il était vraiment dans ce domaine un initiateur.

b) *Théorie des corps flottants*, illustrée par Dupin, dans son ouvrage de 1822 intitulé : *Applications de géométrie et mécanique à la marine*, par J. Duhamel (1797-1872), élève de Fourier, et par le commandant Guyou, avec sa fondamentale *Théorie du navire*.

c) *Problème des figures d'équilibre des fluides en rotation*, objet d'un mémoire célèbre de Poincaré. On savait, depuis Maclaurin et Jacobi, qu'il existe, pour une masse fluide homogène animée d'un mouvement de rotation autour d'un axe fixe et soumise uniquement à l'attraction mutuelle de ses molécules, des figures d'équilibre en forme d'ellipsoïdes de révolution ou à trois axes. Poincaré montre — résultat indiqué aussi, indépendamment, par le géomètre russe Liapounov — l'existence d'une infinité d'autres figures, voisines des ellipsoïdes, et présentant des formes étranges : l'une d'elles, très étudiée depuis, est connue sous le nom de figure piri-forme. Un second mémoire de Poincaré aborde la question de sa stabilité : en suivant la voie qu'il indique, on a conclu par la suite à l'instabilité, ce qui détruit certaines déductions, d'ordre cosmogonique, que l'on avait cru pouvoir tirer de la forme de cette figure d'équilibre. D'autres problèmes de stabilité ont été traités par Duhem ; les difficiles questions analogues pour une masse fluide hétérogène, autrefois abordées par Clairaut, l'ont été plus récemment par M. Hamy et M. Véronnet ; enfin la figure d'équilibre d'une masse fluide soumise à l'attraction d'un corps solide éloigné — un satellite, par exemple, vis-à-vis de sa planète — est l'objet des très remarquables travaux d'Édouard Roche (1820-1883).

VII

L'ASTRONOMIE Il faudrait consacrer un ouvrage complet aux progrès de l'astronomie pendant le dix-neuvième siècle : tant de découvertes sont venues enrichir l'ensemble de nos connaissances sur cette science, tant de méthodes nouvelles théoriques et instrumentales ont perfectionné nos moyens d'investigation ! Mais on peut dire que, ce qui domine

en astronomie, c'est, et de plus en plus, cette branche de l'*astrophysique* qui met à contribution toutes les ressources de l'optique et de la photographie pour les appliquer aux recherches solaires, planétaires ou stellaires ; la physique règne sans conteste en astronomie : et ce n'est plus dans notre chapitre de l'histoire des sciences qu'il faut chercher l'exposition des principales découvertes astronomiques contemporaines. Nous nous bornerons à l'étude de deux points particuliers, ceux-là purement mathématiques, et dans lesquels la

part du dix-neuvième siècle français a été de première importance, la mécanique céleste et la géodésie.



MÉCANIQUE CÉLESTE. Si la mécanique rationnelle du dix-neuvième siècle n'a fait que suivre Lagrange, la mécanique céleste s'est pendant longtemps contentée de continuer Laplace. Durant la première moitié du siècle, Cauchy a été le seul à imaginer une méthode originale, parvenant, par l'application du calcul des résidus, à un nouveau développement en série de la fonction perturbatrice. Parmi les continuateurs de Laplace, nous citerons : Poisson, qui s'occupe de la libra-

tion, de l'invariabilité des grands axes dans le système solaire ; le baron Damoiseau, auteur de travaux sur les satellites de Jupiter ; Delaunay (1816-1872) dont le nom restera attaché à la théorie de la Lune, qu'il met sur pied à peu près complètement, malgré la difficulté du sujet et les calculs considérables qu'il nécessite ; Félix Tisserand (1845-1896), dont le critérium pour reconnaître si une comète est nouvelle ou non est classique, et dont le *Traité de mécanique céleste* est entre toutes les mains ; Callandreau, M. Hamy, Féraud, auteurs de travaux plus récents sur la fonction perturbatrice. On doit à divers astronomes français des tables fondamentales pour la théorie des planètes : celles d'Alexis Bouvard (1767-1843) sont les plus anciennes ; celles de Gaillot les plus récentes. Rodolphe Radau (1835-1911), inventeur d'un procédé graphique très élégant pour la résolution de l'équation de Képler, donne des tables de réfraction atmosphérique universellement en usage aujourd'hui.

Mais l'événement astronomique le plus éclatant du siècle est sans contredit la découverte de la planète Neptune, au moyen du seul calcul, par Urbain Le Verrier (1811-1877). On en connaît l'histoire cent fois contée : les irrégularités constatées par Alexis Bouvard, puis par son neveu Eugène Bouvard, dans les tables du mouvement d'Uranus restaient inexpliquées : encouragé par Arago, Le Verrier, ingénieur des manufactures de l'État, qui avait déjà publié deux mémoires sur les inégalités séculaires, et qui calculera par la suite des tables planétaires d'une étendue et d'une importance énormes, se lance dans l'étude du problème : « Se pourrait-il », énonce-t-il lui-même, « qu'Uranus fût soumis à d'autres influences que celles qui résultent des actions du Soleil, de Jupiter et de Saturne ? Parviendrait-on à déterminer la cause de ces inégalités imprévues ? Pourrait-on en venir à fixer le point du ciel où les astronomes observateurs devraient reconnaître le corps étranger, source de tant de difficultés ? »

En onze mois, Le Verrier a résolu le problème : la solution, pour lui, est certaine : les irrégularités d'Uranus sont dues à l'action perturbatrice d'une planète encore inconnue ; sans hésiter, il indique quelle doit être la position actuelle de cette planète ; il écrit, le 18 septembre 1846, à l'astronome Galle, de l'Observatoire de Berlin, qui possédait une carte détaillée de la région céleste correspondante : et le jour même où la lettre lui parvient, 23 septembre, Galle, dirigeant sa lunette au point fixé, y trouve l'astre nouveau à cinquante-deux minutes seulement d'écart de la position prévue par Le Verrier. Merveilleuse découverte, qui prouve la puissance de la mécanique céleste, et qui, bien que, coïncidence étrange, un jeune astronome anglais, John Couch Adams, soit parvenu presque simultanément au même résultat, appartient sans conteste à Le Verrier, « maintenant l'astronomie mathématique française au premier rang, que Laplace lui avait conquis ».

L ES MÉTHODES NOUVELLES.
POINCARÉ

Nul n'était capable d'ouvrir, en mécanique céleste, un chapitre qui fût entièrement nouveau, si ce n'est Poincaré. Le roi Oscar II de Suède, que les mathématiques intéressaient, avait institué en 1885 un concours entre les savants du monde entier : plusieurs sujets avaient été proposés par une commission, composée de Weierstrass, Hermite, et M. Mittag-Leffler ; de nombreux mémoires avaient été envoyés : la France peut être fière de penser que le grand prix fut remporté par Poincaré, tandis qu'une médaille d'or — seule autre récompense décernée — était attribuée à M. Paul Appell pour un travail sur la théorie des fonctions abéliennes. Le mémoire de Poincaré

était intitulé : *Sur le problème des trois corps et les équations de la dynamique*. Les notions qu'il introduit, et développe ensuite dans son grand ouvrage : *Les méthodes nouvelles de la mécanique céleste*, sont fondamentales : il crée les invariants intégraux, et en montre le rôle ; il étudie, par les équations aux variations, les solutions voisines d'une solution donnée ; il discute les diverses sortes de solutions périodiques, asymptotiques, doublement asymptotiques ; il indique un changement de variable dont s'est servi M. Sundman, l'astronome d'Helsingfors qui a donné, en 1913, la solution théorique rigoureuse du problème des trois corps. Comme le disait Weierstrass dans son rapport sur le mémoire couronné, ce travail « ouvre une ère nouvelle dans l'histoire de la mécanique céleste » ; et, dans cette science, lorsque l'Angleterre prononcera le nom de Newton et l'Allemagne celui de Gauss, la France pourra leur opposer, non seulement Laplace, mais encore Poincaré.

Ne séparons pas de la mécanique céleste générale deux problèmes qui s'y rattachent : la théorie des *marées*, où les travaux modernes principaux sont dus à sir G. H. Darwin et à lord Kelvin, mais à laquelle Poincaré a consacré des leçons réunies en volume par M. Fichot, et où l'on doit signaler les recherches de Ph. Hatt et d'un jeune astronome de Toulouse, A. Blondel, disparu dans la Grande Guerre ; et les *Hypothèses cosmogoniques*, en général plus ou moins dérivées de celle de Laplace, comme celles de Roche, de Charles Wolf, et de Hervé Faye.

GÉODÉSIE La géodésie comporte une partie théorique, qui n'a guère avancé depuis Legendre, et une partie pratique, mesure des bases et triangulation sur le terrain, qui, au contraire, fait pendant le dix-neuvième siècle de grands progrès. Des instruments nouveaux sont utilisés : après la règle bimétallique de Borda, perfectionnée par le major italien Porro, on se sert de plus en plus de l'appareil à fil, imaginé par l'ingénieur suédois Jäderin, et mis au point par M. Ch.-Ed. Guillaume, l'inventeur du métal *invar* ; pour certains travaux, l'astrolabe à prisme de MM. Claude et Driencourt est d'un usage courant ; tandis que le géographe et explorateur Antoine d'Abbadie (1810-1897), fondateur de l'observatoire d'Abbadia près d'Hendaye, propose, pour les triangulations rapides, un instrument qu'il appelle *aba* et avec lequel il fait, de 1837 à 1848, le levé géodésique de l'Éthiopie. Les signaux horaires de télégraphie sans fil émis par la Tour Eiffel ont résolu, depuis quelques années, et de la façon la plus simple, bien des problèmes difficiles, comme celui des différences de longitude.

La France a toujours fait une part importante aux travaux de géodésie. Le corps

des *ingénieurs-géographes*, créé en 1706 par Vauban, spécialement affecté à ce genre d'études, prend, au début du dix-neuvième siècle une grande extension : ses membres, les Puissant, les Henry, les Corabœuf, sont les véritables organisateurs de la carte de France au quatre-vingt millième. Supprimé en 1831 et rattaché à l'État-major, ce corps retrouve quelque autonomie avec la création en 1886 du *Service géographique de l'armée*. Ce sont les officiers de ces groupements, le colonel Laussedat, auteur d'un procédé de restitution de la perspective, le général Bassot, mort en 1917 directeur de l'observatoire de Nice, le général Perrier, premier directeur du service géographique, le général Bourgeois, qui ont publié les diverses cartes de France, celle dite d'*Etat-major* en noir, celle en couleurs au deux cent millième, les magnifiques feuilles en couleur au cinquante millième, ainsi que la carte d'Algérie. Ce sont eux aussi qui ont effectué les deux principales opérations géodésiques confiées à des Français pendant ces dernières années ; la première est le rattachement de l'Algérie au réseau espagnol (1879), par-dessus la Méditerranée, au moyen de signaux de nuit lancés du sommet du Mulhacen, Sierra Nevada, par la mission espagnole du général Ibanez, et observés depuis le Filhaoussen, montagne du département d'Oran, par la mission du général Perrier, ce qui a permis de terminer la mesure d'un arc de méridien de 29 degrés d'amplitude, allant des îles Shetland au Sahara algérien ; la deuxième est la mesure, de 1901 à 1906, sous la direction du colonel Bourgeois, d'un arc situé en pleine région équatoriale, de plus de cinq degrés d'amplitude, le long de la chaîne des Cordillères, entre Tulcan, aux frontières de la Colombie, et Payta, au nord du Pérou : cet arc, connu sous le nom d'arc de Quito, comportait soixante-quatorze stations, dont dix-huit à plus de quatre mille mètres d'altitude ; c'était la répétition, avec les moyens modernes, du travail de Bouguer et La Condamine.

Le *nivellement*, ou détermination des altitudes, soit par observation du baromètre (et il faut citer à ce propos les recherches de Biot et de Babinet), soit mieux par opérations trigonométriques, constitue un groupe de travaux d'une grande importance. Le premier nivellement d'ensemble du sol français a été exécuté de 1855 à 1867 sous la direction de l'ingénieur Bourdaloue. Les altitudes de plus de dix-sept mille points sont aujourd'hui indiquées sur des repères métalliques permanents, placés par les soins du service du nivellement général, actuellement rattaché au ministère des Travaux publics. Le zéro de l'échelle, niveau moyen des mers, est déterminé par un repère primordial, situé dans l'anse Calvo à Marseille ; pour obtenir ce niveau moyen, les instruments utilisés sont le marégraphe de Chazallon (1840), ou mieux le médimarémètre de M. Charles Lallemand.

Une question voisine de la géodésie est la détermination des coordonnées géographiques, latitude et longitude, et en particulier le *point* à la mer : là les travaux sont innombrables, avec les noms de Goulier, de Marcq Sainte-Hilaire, de l'amiral Fleuriais, d'Yvon Villarceau, du commandant Guyou : et il faudrait, pour être complet sur ce sujet, faire aussi une place à la chronométrie de précision, objet des études théoriques des Français Philips, Bréguet, Caspari, entre autres.

VIII

LES TENDANCES CONTEMPORAINES EN MATHÉMATIQUES L'héritage légué au vingtième siècle par les Cauchy et les Poncelet, les Fourier et les Poisson, est lourd : les mathématiciens français contemporains savent le faire fructifier. Les uns, dont nous avons rencontré les noms chemin faisant, continuent à marcher dans les voies explorées déjà par leurs aînés, perfectionnant les méthodes, complétant les résultats, fouillant jusqu'au bout les notions acquises et leur faisant rendre tout le possible. Les autres préfèrent se tourner vers ces théories modernes et du plus haut intérêt, les fonctions de variables réelles envisagées sous un jour nouveau, et les ensembles. Vers la fin du dix-neuvième siècle, en effet, apparaissent certaines notions jusque-là insoupçonnées : Weierstrass, et indépendamment de lui Darboux, donnent des exemples de fonctions continues n'admettant pas de dérivée, révélations accueillies avec enthousiasme par beaucoup de jeunes, mais dont certains, comme Hermite, « se détournaient avec effroi et horreur » ; le géomètre allemand George Cantor fonde la théorie des *ensembles*, faisant rentrer dans le cadre des mathématiques des êtres qu'on en avait exclus jusque-là : du Bois-Reymond en Allemagne, Dini et Veronese en Italie le suivent, tandis qu'en France, où les esprits sont préparés par Jules Tannery, longtemps directeur scientifique très influent de l'École normale, toute une génération va se jeter avec succès dans le mouvement nouveau. Reconnaisant comme précurseur Camille Jordan, avec son théorème sur les courbes fermées, son introduction de la notion de fonction à variation bornée, et sa définition précise de la mesure des ensembles, cette école obtient vite des résultats de premier ordre : M. Borel définit les ensembles dénombrables et de mesure nulle ; M. Lebesgue précise ces idées, leur donne des bases logiques et en montre la grande portée, et renouvelle, avec ses fonctions *sommables*, toute la théorie de l'intégration, des aires et surfaces, des séries de Fourier ; M. Arnaud Denjoy introduit l'opération nouvelle de la *totalisation*, pour la recherche

des primitives dans le cas le plus général ; M. Baire répartit les fonctions en différentes classes, donnant sur cette division des théorèmes importants ; M. Fréchet prolonge ces travaux, et entreprend l'étude du continu fonctionnel ; M. Montel cherche l'ordre d'approximation avec lequel on peut représenter une fonction par une série de polynômes. Ainsi ces théories modernes, auxquelles, à leur début, on pouvait reprocher d'être plus critiques et philosophiques que vraiment géométriques, ont à présent — et, on peut le dire, surtout grâce à l'apport de la France, — indiqué à l'analyse des points de vue nouveaux et des méthodes fort intéressantes, entraînant peu à peu à se passer du calcul véritable, devenu impuissant dans les cas généraux, et à substituer à la mathématique des quantités une mathématique des qualités. Dans ce domaine comme dans les précédents, il semble bien, suivant la remarque de M. Émile Picard, que les géomètres français « sont restés sagement dans de justes limites, n'oubliant jamais que leur science n'est pas un pur exercice de logique, et se montrant avant tout soucieux de la découverte de faits mathématiques nouveaux et de rapprochements jusque-là insoupçonnés ». N'est-ce pas là en effet la grande tradition de cette France qui, créant l'algèbre avec Viète et la géométrie analytique avec Descartes, ayant, avec Fermat, la première idée du calcul différentiel, donnant des bases solides, avec d'Alembert et Lagrange, à la mécanique rationnelle, avec Laplace à la mécanique céleste, avec Fourier à la physique mathématique, renouvelant de fond en comble l'analyse avec Cauchy, l'algèbre avec Galois, la géométrie avec Poncelet, inscrivant enfin, dans tous les domaines, le nom de Poincaré, s'est toujours maintenue, dans le monde entier, à la tête du mouvement mathématique ?



HISTOIRE DES SCIENCES EN FRANCE

DEUXIÈME PARTIE

HISTOIRE DE LA PHYSIQUE

PAR

CHARLES FABRY

PROFESSEUR A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS



CHAPITRE PREMIER

LA PÉRIODE ANCIENNE JUSQU'AU DÉBUT DU DIX-SEPTIÈME SIÈCLE

Les éléments dont est fait le développement de la physique. — Difficulté de l'histoire de la physique à ses débuts. — Lien entre la physique, la mécanique et l'astronomie. L'optique. La boussole.



La physique moderne, cette science si vaste et si variée, dont nous devons ici retracer la lente formation, n'a pu se développer que par la convergence d'efforts d'origines très diverses, la collaboration d'ouvriers travaillant avec des outils très variés. L'histoire de la physique n'est pas seulement, il s'en faut de beaucoup, l'histoire de la pensée humaine dirigée vers les secrets de la nature ; c'est aussi, peut-être en première ligne, l'histoire d'une technique, ou plutôt d'une collection de techniques, dont chacune était nécessaire au progrès d'une branche de la physique, et sur laquelle ce progrès a réagi. « L'imagination de l'homme, a écrit Lamarck, ne saurait créer une seule idée qui ne prenne sa source dans celles qu'il s'est procurées par ses sens. » Aucune découverte, dans les sciences physiques, n'est possible qui n'ait comme origine l'amélioration des moyens propres à étendre ce témoignage.

Les progrès techniques ne suffisent cependant pas au développement de la

science ; l'esprit philosophique doit s'emparer de ces témoignages épars et les condenser en idées générales, et c'est dans ce mutuel appui entre l'abstrait et le concret, dans cet avancement de l'un par l'autre que réside la condition particulière de l'histoire de la physique. Tantôt ce sont les idées générales qui vont en avant et doivent attendre les moyens techniques qui permettront de les mettre en œuvre et de les préciser ; tantôt, au contraire, ces moyens techniques sont prêts les premiers et attendent un esprit généralisateur qui les utilisera et coordonnera les résultats d'expérience. Les progrès de l'optique et, indirectement, ceux de l'astronomie, ont été longtemps liés au progrès de l'industrie du verre et de l'art de tailler les lentilles ; les idées de Copernic et de ses prédécesseurs auraient pu, presque indéfiniment, rester à l'état d'hypothèses sans fondement, si l'on n'avait pas vu les satellites tourner autour des planètes. Inversement, au dix-huitième siècle, on disposait de tous les moyens que devaient employer Young et Fresnel pour fonder la théorie des ondes, mais il manquait l'esprit assez hardi pour tirer les conséquences d'expériences dès lors faciles à faire.

Pour construire ses théories et en tirer leurs conséquences, le physicien a besoin d'un autre instrument : les lois de la physique, dès que l'on sort des cas les plus élémentaires, ne peuvent être formulées qu'en langage mathématique, et l'algèbre est nécessaire pour en développer les conséquences. Comme pour l'outil matériel, il y a interdépendance entre le progrès de la physique et le perfectionnement de l'instrument mathématique. Bien souvent, le progrès de la physique a dû attendre que le progrès des mathématiques vienne fournir l'instrument indispensable ; d'autres fois, cet outil a été, en quelque sorte, forgé d'avance, et a dû attendre longtemps que quelqu'un trouve l'occasion de s'en servir ; très souvent enfin, c'est la nécessité de résoudre un problème posé par la nature qui a donné l'idée de faire entrer les recherches mathématiques dans une voie nouvelle dans laquelle aucun mathématicien n'aurait songé à s'engager. Le calcul infinitésimal aurait-il été créé si les progrès de la dynamique n'avaient révélé que la plupart des lois de la physique se présentent d'elles-mêmes sous forme d'équations différentielles ?

DIFFICULTÉ DE L'HISTOIRE DE LA PHYSIQUE A SES DÉBUTS

Il est relativement facile de suivre, pour la période moderne, ce développement complexe de la physique, marchant de pair et entraînant en partie avec lui, d'une part celui des mathématiques, d'autre part celui de toute la technique. Pour la période ancienne, ces conditions particulièrement complexes rendent l'histoire de la physique extraordinairement difficile, incertaine, presque hypothétique. Dans la période

moderne, on sait assez exactement ce qui s'enseignait à chaque époque dans les écoles, et cela seul donne une idée assez précise de l'état de la science ; au treizième ou au quatorzième siècle, par exemple, il est déjà très difficile de savoir ce que l'on apprenait dans les Universités, et le saurait-on exactement, cela ne donnerait qu'une idée très imparfaite de la science de cette époque. Ce n'est pas seulement dans les Universités que devraient être cherchés les précurseurs des physiciens modernes, c'est aussi, et peut-être plus encore, parmi les artisans, qui exerçaient des métiers déjà très perfectionnés, probablement sans s'occuper des disputes d'école. De nos jours, il y a un lien étroit entre les idées théoriques des physiciens, leurs recherches de laboratoire, et d'autre part les procédés employés par les ouvriers dans les ateliers, si bien qu'en lisant les ouvrages des uns on peut se faire une idée assez nette de ce que font les autres ; au quatorzième siècle, la fabrication des verres de besicles était fort développée, l'usage des lunettes était répandu dans toute l'Europe, et le peu que l'on trouve dans les écrits provenant des écoles ne dénote qu'une connaissance rudimentaire de la théorie de l'œil et des lois de l'optique. Entre les deux catégories d'hommes, artisans et docteurs, il n'y avait à peu près aucun lien. De même, à l'époque où les principes de la mécanique étaient, dans les écoles, encore bien mal assis, les bâtisseurs de cathédrales trouvaient par des moyens que nous ignorons, à des problèmes de statique et de résistance des matériaux, des solutions qui pourraient effrayer plus d'un ingénieur de notre temps. Même pour les mathématiques, il n'est pas certain que l'étude des ouvrages des écoles donne une idée complète des moyens dont pouvaient disposer les techniciens de la période ancienne de notre science. La géométrie des Grecs, mise sous sa forme la plus parfaite par Euclide, était d'une telle rigidité dans sa chaîne d'impeccables syllogismes, qu'elle se prêtait bien mal à toute application. Mais, comme l'a si justement remarqué Pierre Boutroux, à côté de cette science contemplative, une technique a dû se développer, dont le but était strictement utilitaire, et sur laquelle nous savons très peu. C'est cette *technique*, plus que le développement de la pure logique, qui est intéressante pour le physicien, et les livres des écoles nous renseignent très peu sur elle.

Ces considérations serviront d'explication, presque d'excuse, à la brièveté des indications que nous donnerons ici sur le développement de la physique au moyen âge et jusqu'à la fin du seizième siècle, bien que, sans aucun doute, la physique moderne dérive directement des progrès techniques accomplis pendant cette période, progrès qui permirent d'aller beaucoup plus loin que ne l'avaient fait les anciens. Il faut d'ailleurs reconnaître que l'antiquité n'avait, en ce qui concerne

la physique, transmis au moyen âge que des notions bien confuses, et que ce qui avait ainsi surnagé de la science antique n'en était peut-être pas la partie la plus substantielle.

L IEN ENTRE LA PHYSIQUE, LA MÉCANIQUE ET L'ASTRONOMIE

L'histoire de la mécanique et de l'astronomie a été écrite, dans ce volume, avec celle des mathématiques, et nous n'avons pas à y revenir ici. Faisons seulement remarquer qu'à leurs débuts ces deux sciences ne sont pas nettement distinctes de la physique, et que les lois de l'équilibre et du mouvement sont forcément à la base de toute la physique. Jusqu'au dix-septième siècle, le plus grand effort des hommes tournés vers l'étude des phénomènes naturels a été consacré à la recherche de ces lois, qui n'ont été vraiment au-dessus de toute contestation qu'après Newton. Ce qu'avait laissé l'antiquité était, sauf sur un petit nombre de points, très imparfait, parfois vraiment absurde ; il semble y avoir eu, avant le triomphe de la dynamique moderne, une série d'avances et de reculs, les idées raisonnables basées sur l'observation des faits se faisant jour à certains moments et dans certains milieux, tandis qu'ailleurs, et un peu plus tard, la réaction venant des commentateurs de ce qui subsistait de la science grecque étouffait tout progrès. La belle période de l'Université de Paris, vers le quatorzième siècle, paraît avoir été, chez nous, une de ces époques de progrès scientifique, au moins dans un certain milieu ; quelques-uns des maîtres de cette Université, d'après les savantes recherches de Pierre Duhem, auraient découvert une première fois la loi de l'inertie et les principes corrects de la dynamique, et un peu plus tard auraient énoncé des idées claires sur le mouvement des astres, idées que l'Église n'aurait nullement alors songé à combattre. Au contraire, la période de la Renaissance qui a immédiatement précédé Galilée et Descartes pourrait être considérée, en ce qui concerne les sciences physiques, comme une période d'éclipse et de réaction, après laquelle tout était à retrouver.

En dehors de ces questions de mécanique, d'astronomie et de géographie générale, qui n'entrent pas dans le cadre de notre étude, ce que l'on peut dire de certain sur les progrès de la physique pendant la période qui va jusqu'au dix-septième siècle se réduit, vraiment, à bien peu de chose.

L 'OPTIQUE

Sur l'optique, les anciens avaient déjà laissé quelques indications exactes : Euclide connaissait la notion de rayon lumineux, la loi de la réflexion, les propriétés des miroirs plans et en partie celles des miroirs sphériques ; Ptolémée avait donné des indications exactes sur la réfraction. Le moyen âge ajouta

quelque chose à ces connaissances théoriques ; le moine Roger Bacon, qui avait étudié à Paris, mais qui paraît avoir passé presque toute sa vie en Angleterre, donne dans son *Opus majus*, écrit en 1267, des indications exactes sur la réfraction par les surfaces sphériques. C'est de quelques années plus tard que paraît dater l'invention des besicles, sans que l'on puisse dire où et comment cette invention fut faite ; elle paraît s'être répandue assez rapidement, car, au quatorzième siècle, l'usage des lunettes pour myopes et pour presbytes était universellement connu. Ce fut le début de l'optique appliquée ; les combinaisons de lentilles, formant les télescopes ou les microscopes, ne vinrent qu'au commencement du dix-septième siècle.

Dans le domaine de l'optique, on ne peut manquer de citer un livre, publié en Italie à la fin de la période qui nous occupe, qui eut, à la fin du seizième et au commencement du dix-septième siècle, dans toute l'Europe, un nombre immense de lecteurs. La première édition parut en 1558, sous ce titre un peu bizarre : *Magia naturalis, sive de miraculis rerum naturalium*.

L'auteur, un noble napolitain, s'appelait Giambattista della Porta. Les éditions latines, de plus en plus étendues, se succédèrent rapidement, en 1561, 1564, 1585 ; elles étaient imprimées chez Plantin, le célèbre imprimeur d'Anvers. L'ouvrage fut traduit et imprimé en hollandais, en italien, en français, en espagnol, en allemand, en arabe. C'était un assemblage bizarre de fables, de superstitions, d'absurdités même, mêlées avec un exposé de ce que l'on savait alors des lois de la physique ; c'est à ce point de vue que le livre est intéressant pour nous, parce qu'il permet de se faire une idée de ce qu'étaient les connaissances scientifiques des lecteurs innombrables du livre de Porta. Le chapitre consacré à l'optique est particulièrement intéressant : il contient la description de la *chambre noire*, peut-être inventée ou réinventée par Porta lui-même, ainsi qu'une description assez exacte de l'œil et des indications encore très imparfaites sur le rôle des différentes parties de cet organe.

L A BOUSSOLE Les anciens avaient découvert deux des phénomènes fondamentaux de la science de l'électricité et du magnétisme : l'attraction des corps légers par l'ambre frottée, expérience qui a été le point de départ de l'*électrostatique*, et l'attraction du fer par certains minerais naturels, origine des phénomènes *magnétiques*. Le moyen âge apporta, dans cette science, une invention remarquable, celle de la boussole, qui, en dehors de sa très grande importance pratique, eut pour conséquence d'empêcher que l'attention des techniciens se détournât des phénomènes découverts par les anciens.

Probablement connue des Chinois depuis une haute antiquité, et plus tard des Arabes, la boussole paraît avoir été d'usage courant chez les navigateurs des pays d'Occident dès le treizième siècle, sans qu'il soit possible de dire par qui et à quelle époque elle fut importée ou inventée. Une poésie de Guyot de Provins, écrite vers 1190, en parle en termes parfaitement clairs ; une description détaillée en est donnée, au milieu du treizième siècle, par Thomas de Contimprés.

Peut-être les croisades, en développant les communications par mer, contribuèrent-elles au perfectionnement de la boussole. Pierre de Maricourt, connu aussi sous le nom de Petrus Peregrinus (Pierre le Pèlerin) parce qu'il avait suivi saint Louis dans une de ses croisades, avait accompagné Charles d'Anjou en Italie, comme ingénieur ; il vécut plus tard à Paris où il fut l'ami de Roger Bacon. Pendant le siège de Lucéra en 1269, il composa, sous forme de lettre à son ami Syger de Foucaucourt, un ouvrage sur l'aimant sous le titre : *Epistola Petri Peregrini de Maricourt ad Sygerum de Foucaucourt militem de Magnete*, qui a eu cette bonne fortune d'être conservé jusqu'à nous après avoir été imprimé en 1558, et d'être plusieurs fois réimprimé et commenté de nos jours. On a beaucoup discuté pour savoir si l'auteur expose ses propres découvertes ; il est plus probable que son livre est un exposé de tout ce qui était connu à son époque sur l'aimant et la boussole. On y trouve les moyens à employer pour distinguer l'un de l'autre les pôles d'une pierre d'aimant, l'art d'aimanter des aiguilles de fer, la description des actions magnétiques, y compris le fait que ces actions s'exercent à travers les corps comme le verre ou la main ; plusieurs sortes de boussoles y sont décrites, les unes faites avec un aimant naturel, les autres avec une aiguille aimantée comme dans les modernes *compas*.

Au moment où commencent les grands voyages maritimes d'exploration, à la fin du quinzième siècle, l'emploi de la boussole était assez répandu pour que la construction de cet instrument pût alimenter une petite industrie, et les musées possèdent encore plusieurs boussoles de cette époque. La déclinaison de l'aiguille aimantée (angle, variable d'un lieu à l'autre, que fait son axe avec la direction Sud-Nord) était déjà connue ; Christophe Colomb la découvrit de nouveau, dès qu'il eut dépassé les Açores, en comparant l'indication de ses boussoles avec le Nord donné par l'observation des astres. L'étude du magnétisme terrestre, dont les causes restent de nos jours si mystérieuses, était amorcée.



CHAPITRE II

LE DIX-SEPTIÈME SIÈCLE

I. *La physique et le mouvement scientifique au dix-septième siècle. Origine d'une ère nouvelle. Le mouvement scientifique. La correspondance entre savants. L'Académie des sciences et l'Observatoire. — II. Les propriétés des fluides. L'horreur du vide. Blaise Pascal et la pression atmosphérique. La pression dans les liquides. Le vide. Mariotte et la mécanique. Élasticité de l'air. La machine à feu. Papin. — III. L'acoustique. Mouvements vibratoires et art musical. Vitesse de propagation. La mécanique des vibrations. — IV. L'optique au dix-septième siècle. L'optique de Descartes. Le principe de Fermat. Le perfectionnement des lunettes. Instruments de mesure. Naissance de la métrologie. Vitesse de la lumière. Le Traité de la lumière de Huygens.*

I

LA PHYSIQUE ET LE MOUVEMENT SCIENTIFIQUE AU DIX-SEPTIÈME SIÈCLE



EST seulement dans la première moitié du dix-septième siècle que la physique commence à s'organiser sous la forme qu'elle a conservée : science basée sur l'expérience, et utilisant les mathématiques pour en coordonner et étendre les résultats.

D'une part, les premiers principes de la mécanique deviennent enfin clairs. Peu importe qu'ils aient été entrevus par de lointains précurseurs ;

ils étaient, au siècle précédent, méconnus de la plupart des contemporains, et ne pouvaient servir de base à une science ; ce n'est qu'au dix-septième siècle, après Galilée et Descartes, que l'on peut commencer à s'appuyer sur eux. D'autre part, avec Galilée, l'expérience, et non plus la simple observation des phénomènes complexes que nous offre la nature, devient la base de toute théorie physique.

Enfin, les mathématiques, sortant de la rigide forme euclidienne, deviennent assez souples pour s'adapter à l'étude de la nature. L'algèbre, sortie de la période préliminaire, devient assez sûre de sa technique pour pouvoir servir d'instrument de travail. La géométrie de Descartes est le premier grand exemple d'application de l'algèbre à un objet autre que la science des nombres, quoique encore mathématique ; mais en même temps Descartes, dans sa *Dioptrique* et ses *Météores*, donne l'application des mathématiques à des questions de physique, résolvant des problèmes d'optique qui auraient été inaccessibles à ses prédécesseurs. Souvent, il est vrai, Descartes se fait illusion sur la certitude des résultats qu'il trouve à cause du peu de solidité de la base sur laquelle il bâtit ses déductions. Il est facile de trouver dans presque tous ses ouvrages de physique de très graves erreurs ; c'est ainsi, par exemple, qu'après avoir admirablement mis en évidence l'importance qu'il y aurait à perfectionner les instruments d'optique inventés peu d'années auparavant, il se trompe complètement sur les causes de leurs imperfections, et entraîne son ami Mydorge à de grosses dépenses pour essayer de réaliser des perfectionnements qui ne pouvaient conduire à aucun résultat. Mais peu importe ; ce qui est définitif dans l'œuvre de Descartes, ce n'est pas d'avoir réussi dans telle ou telle recherche particulière, c'est d'avoir ouvert la voie dans l'application des mathématiques aux problèmes de physique. Ses échecs même, montrant la nécessité de recherches expérimentales plus complètes, contribueront aux progrès de la physique.

L E MOUVEMENT SCIENTIFIQUE

En même temps, l'activité scientifique qui, dans notre pays, était restée très limitée au seizième siècle, plus limitée probablement qu'aux siècles précédents, devient considérable au dix-septième. Ce n'est pas aux universités qu'est dû cet éveil, ou ce réveil, de la curiosité scientifique ; jadis si brillantes, surtout celle de Paris, elles restent figées pour longtemps dans leur enseignement théologique, et se tiennent complètement en dehors du mouvement scientifique nouveau ; seul, le Collège de France, fondé en 1530 par François I^{er}, et d'abord consacré à l'étude des langues anciennes, jette un certain éclat sur l'enseignement des sciences physico-mathématiques, avec Ramus au seizième siècle, avec Gassendi, Roberval, Picard, au dix-septième. Mais ce ne sont pas les

hommes chargés d'enseigner la science qui, au début du dix-septième siècle, fournissent le contingent le plus important de l'armée scientifique ; ce sont des hommes occupant des situations fort diverses, magistrats, serviteurs de l'État dans des fonctions publiques, militaires, religieux, simples particuliers. Tous n'habitent pas Paris ; il s'en trouve dans toutes les parties du royaume. Fabri de Peiresc, le rénovateur de l'astronomie et de la géodésie en France, est conseiller au Parlement de Provence ; Étienne Pascal, le père de Blaise Pascal, est président à la Cour des aides à Clermont, puis intendant à Rouen ; Descartes embrasse d'abord l'état militaire et court l'Europe avec les armées avant de se consacrer uniquement à ses méditations ; Fermat, le grand mathématicien dont le nom est aussi lié à l'histoire de l'optique, était conseiller au Parlement de Toulouse ; Desargues, architecte et mathématicien, habitait Lyon ; Petit, ami et collaborateur de Mersenne et de Pascal, était intendant des fortifications ; Jean Rey, un précurseur de Lavoisier, était médecin au Bugue en Périgord. On pourrait allonger cette liste des noms qui comptent dans l'histoire scientifique de la première moitié du dix-septième siècle ; on y trouverait des hommes éclairés de toutes les professions libérales, la plupart sans aucune attache avec aucun établissement scientifique, consacrant tous leurs loisirs et parfois leur fortune à la science uniquement parce que tel était leur goût.

L'éveil de l'activité scientifique n'est pas chez nous, comme il fut dans d'autres pays, la conséquence de la fantaisie ou de la munificence d'un prince ou d'un ministre ; il ne s'est pas produit parce qu'il aurait été, selon l'expression consacrée, *protégé* par tel ou tel puissant personnage, mais bien parce que tel était le bon plaisir de tous les hommes éclairés de ce temps, et c'est lorsque le mouvement scientifique français a été bien établi que Louis XIV et Colbert songèrent à le protéger pour la plus grande gloire du pouvoir royal. Y a-t-il à regretter que cette protection ait suivi et non précédé le mouvement scientifique français ? Cela n'est pas probable. Pendant la première partie du dix-septième siècle, la science française se développait librement. En 1633, la condamnation de Galilée souleva chez les savants français, même chez ceux qui, comme Mersenne, appartenaient à l'Église, la plus vive indignation et encore plus d'étonnement ; une telle absurdité leur paraissait à peine croyable. La pensée scientifique jouissait en France d'une liberté que d'autres pays étaient loin de connaître.

CORRESPONDANCE ENTRE SAVANTS

Un des organes essentiels de la science moderne manquait aux savants de la première partie du dix-septième siècle. De nos jours, de nombreuses publications périodiques font con-

naître rapidement la moindre recherche scientifique. La presse scientifique n'existait pas à l'époque dont nous retraçons l'histoire, et ses débuts, lents et timides, ne suivirent que d'assez loin la création des gazettes destinées au grand public. Est-ce à dire que les savants restaient isolés, s'ignorant les uns les autres ? Au contraire, les échanges d'idées entre hommes de science ne furent jamais plus actifs, et les questions de physique, ce mot étant entendu dans le sens le plus large, tenaient, avec des questions mathématiques, la plus grande place dans leurs discussions. Ces échanges d'idées se faisaient surtout par lettres, souvent accompagnées de volumineux manuscrits, que l'on communiquait de proche en proche à tous ceux qui pouvaient y prendre de l'intérêt. Cette correspondance n'était pas limitée aux seuls savants français ; plusieurs des plus grands parmi les étrangers y prirent une part active, et la différence de langue n'y mettait aucun obstacle, car si l'emploi du français commence à devenir fréquent comme langue scientifique, l'emploi du latin était encore fort répandu, les hommes de science se servent indistinctement de leur langue maternelle et de la langue latine, et cela jusqu'à la fin du dix-septième siècle et même plus tard. Parmi ces correspondants habituels des savants français, nous trouvons l'illustre physicien de Florence, Galilée, qui eut chez nous plus d'admirateurs que dans aucun autre pays. Galilée, qui fut longtemps très pauvre, ne pouvait pas facilement faire imprimer ses œuvres ; il les copiait ou les faisait copier et les envoyait à quelques amis, parmi lesquels se trouvaient des savants français, particulièrement Gassendi, lui-même lié avec le père Mersenne, et par lui avec tout le monde scientifique français. Aussi, les ouvrages de Galilée furent-ils connus en France bien avant leur impression, d'ailleurs tardive. Les célèbres *Dialogues*, consacrés surtout à la défense du système de Copernic, ne furent publiés qu'en 1632 (Galilée avait alors soixante-huit ans), et valurent à leur auteur, dès l'année suivante, la condamnation de l'Église ; ils étaient déjà connus en France et, dès 1629, le père Mersenne avait écrit à Galilée pour lui proposer de publier son livre à Paris. C'est encore Mersenne qui, en 1634, fait imprimer, en français, *les Mécaniques de Galilée*, ouvrage de statique déjà connu en manuscrit, mais non encore publié. Enfin, c'est de Paris qu'un exemplaire des *Discorsi*, le chef-d'œuvre de Galilée, est communiqué aux frères Elzévier, les célèbres imprimeurs hollandais, qui le publieront en 1638.

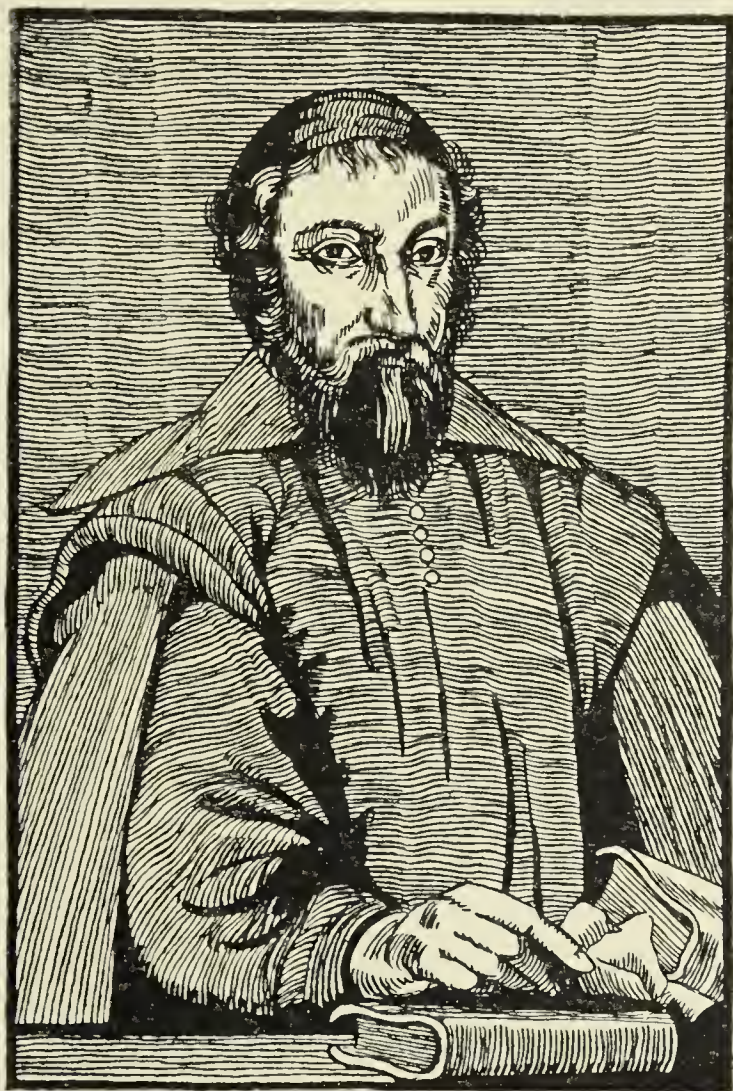
A la même époque, le Hollandais Constantin Huygens, le père de l'illustre Christian Huygens qui devait résider de longues années en France, et lui-même savant distingué en même temps qu'écrivain et homme d'État, est en correspondance fré-



APPLICATION DE LA BOUSSELE A LA CONDUITE DES NAVIRES
(Nefs Françaises vers 1500.)

quente avec les savants français, en particulier avec Descartes, qui compose spécialement pour lui un de ses traités.

Dans cet échange d'idées par correspondance, quelques hommes de science jouent un rôle particulièrement actif, servant de lien entre les savants de leur temps,



FABRI DE PEIRESC
(D'après une gravure de Béchét).

jouant presque le rôle que remplissent aujourd'hui les journaux scientifiques. Voici, par exemple, Fabri de Peiresc, né en 1580, conseiller au Parlement d'Aix jusqu'à sa mort en 1637, collaborateur du garde des sceaux Guillaume du Vair de 1616 à 1623. Instruit de toutes les sciences de son temps, archéologue, latiniste, amateur d'art, il s'intéresse surtout à l'astronomie et à la géographie et contribue pour une large part à redresser les erreurs énormes qui existaient sur les cartes des régions les mieux connues du globe terrestre. De nombreux voyages à Paris, en Angleterre, aux Pays-Bas, en Italie, l'avaient mis en rapport avec tous les hommes instruits de son temps, et il ne cessa d'entretenir avec eux une immense correspondance ; ce que l'on a pu en retrouver a été publié seulement en partie et forme sept volumes ; à sa mort, on trouva chez lui dix

mille lettres, en partie perdues. Son nom ne se trouve sur aucun ouvrage imprimé de son vivant, et cependant son influence fut considérable.

Né en 1588, Marin Mersenne, après avoir été le condisciple de Descartes au collège de la Flèche, avait pris l'habit religieux dans l'ordre des Minimes. Après avoir hésité quelque temps sur la voie qu'il suivrait et composé des ouvrages contre les idées nouvelles, il change de route, peut-être sous l'influence de Des-

cartes, apprend les mathématiques (où il ne fut jamais qu'un médiocre élève) et, à partir de 1626, se rallie au grand mouvement physico-mathématique de son temps. Si Peiresc n'avait rien publié, Mersenne, au contraire, fait imprimer chaque année de nouveaux volumes, auxquels il joint souvent les œuvres de ses correspondants, en leur rendant toujours justice. C'est par son intermédiaire que Blaise Pascal, en 1644, a connaissance de « l'expérience du vif-argent » de Torricelli, et c'est probablement lui qui suggère la célèbre expérience du Puy de Dôme. Parfaitement indépendant, il n'a d'autre préoccupation que la vérité et le progrès de la science ; les rivalités personnelles le laissent indifférent. Roberval et Descartes, rivaux dignes l'un de l'autre, se détestent ; Mersenne reste en correspondance avec l'un et avec l'autre, sans jamais relever les violences de l'un ni l'insolence hautaine de l'autre. Sans avoir attaché son nom à aucune grande découverte, il reste l'un des meilleurs serviteurs de la science de son temps.

**L'ACADÉMIE DES SCIENCES
ET L'OBSERVATOIRE**

A partir de 1633, diverses réunions scientifiques, les unes ouvertes au grand public, d'autres limitées à un petit cénacle, eurent lieu à Paris ; les questions de physique y tenaient une certaine place, et elles eurent au moins cet avantage qu'elles tinrent l'opinion publique éveillée sur les questions scientifiques, même lorsque ces questions n'étaient traitées que d'une manière superficielle.

Tout cela s'était passé sans la moindre intervention de l'État. Cependant, à diverses reprises, l'idée était venue de fonder une réunion d'hommes de science, à qui l'on donnerait les moyens de travailler. Ce fut Colbert, conseillé par l'architecte et médecin Claude Perrault, qui réalisa cette idée par la création, en 1666, de l'Académie des sciences. L'histoire de cette création et celle de la fondation de l'Observatoire a été écrite dans une autre partie de ce volume. Rappelons seulement, puisqu'il s'agit ici de l'histoire de la physique, que l'Observatoire était tout d'abord destiné à devenir le lieu de travail commun (nous dirions aujourd'hui le laboratoire) de tous les académiciens. Au début, on n'y fit pas seulement de l'astronomie, mais aussi des expériences de physique et de chimie, et même de l'anatomie. Afin de donner encore plus d'éclat à la nouvelle académie, Colbert chercha à y attirer quelques savants étrangers de grand renom. C'est ainsi qu'en 1666 arriva à Paris le mathématicien et physicien hollandais Christian Huygens, déjà célèbre par ses découvertes en mécanique et en astronomie. Son séjour à Paris dura quinze années, pendant lesquelles il prit la plus grande part aux travaux de l'Académie et composa quelques-uns de ses plus beaux ouvrages, entre autres son célèbre *Traité de la*



VISITE DE LOUIS XIV A L'OBSERVATOIRE LE 1^{er} MAI 1682
(D'après une gravure de Sébastien Le Clerc.)

lumière; il quitta la France en 1681, très probablement à cause de la déplorable politique religieuse qui devait aboutir à la révocation de l'édit de Nantes. En même temps que lui partit l'astronome danois Rømer, que Picard avait ramené en France en 1671 et qui, pendant son séjour à Paris, s'était illustré par la découverte de la vitesse de la lumière. En 1669, Colbert fait venir en France l'astronome Dominique Cassini, qui obtint sa naturalisation en 1673 et dont les descendants, jusqu'à la quatrième génération, occupèrent une situation prépondérante dans l'astronomie française.

Pendant la période de construction de l'Observatoire, les expériences en commun étaient faites à la bibliothèque du roi, installée rue Vivienne. Des résultats très importants furent obtenus en astronomie ainsi que dans l'art des observations ; c'est pendant cette période que fut inventé le micromètre pour les observations astronomiques, que fut réalisé l'emploi des lunettes pour la mesure des angles et l'usage des horloges pour les observations astronomiques, et ce fut vraiment une œuvre collective. En physique, les résultats furent moins importants, bien que certaines expériences sur le pendule, sur l'élasticité des gaz, sur l'écoulement des liquides aient certainement été, en partie, le résultat d'une collaboration effective entre les académiciens. Toutefois, cette collaboration devint de moins en moins profitable. Louvois, à plusieurs reprises, essaya de l'orienter vers des buts utilitaires, sans obtenir aucun résultat. En 1699, le règlement de l'Académie fut modifié, et l'on cessa d'imposer à ses membres une collaboration stérile.

II

LES PROPRIÉTÉS DES FLUIDES

L'^{HORREUR}
DU VIDE La mécanique, fondée par Galilée et par Descartes, était basée sur l'idée de corps solide indéformable, corps imaginaire dont les solides réels se rapprochent beaucoup, entre certaines limites. Pour les liquides, qui peuvent se déformer d'une infinité de manières, les problèmes sont encore bien plus compliqués ; sur ce point, la technique avait de beaucoup devancé la science. On savait depuis bien longtemps conduire l'eau par sa pente naturelle, l'élever au moyen de pompes, la faire jaillir à un niveau plus bas, sans qu'aucune théorie nette ait été posée pour coordonner les résultats de la pratique, sans que la

notion de pression ait été dégagée ni le rôle de la pression atmosphérique reconnu. A part le merveilleux énoncé sur les corps immergés dû au génie d'Archimède, étayé sur des raisonnements qui nous sont difficilement accessibles, à peu près rien n'était rattaché à des principes clairs. Du temps de Galilée, l'ascension de l'eau dans les pompes et la suspension d'un liquide dans un vase retourné sur un bassin étaient encore expliquées par « l'horreur du vide », explication qui ne faisait guère que répéter, en termes moins clairs, ce qu'il fallait expliquer. Ce sont, sans aucun doute, des praticiens qui ont remarqué les premiers que l'eau ne peut être élevée, au moyen d'une pompe, à plus de dix mètres. Cette règle pratique était connue de Galilée, et c'est elle qui conduisit ses élèves, en particulier Torricelli, à essayer l'expérience du tube fermé et retourné en employant un liquide beaucoup plus dense que l'eau, le mercure. On trouva (1644) que le liquide se maintenait seulement à vingt-huit pouces de hauteur, laissant le vide au-dessus de lui. Réfléchissant sur cette expérience, Torricelli arriva à cette conclusion que l'horreur du vide n'expliquait rien, et eut l'idée, sans autre démonstration, de faire intervenir la pression atmosphérique.

B LAISE PASCAL ET LA PRES- SION ATMOSPHÉRIQUE

En France, l'expérience fut connue par l'intermédiaire de Mersenne qui en tenait la description d'un ami de Torricelli, et qui eut l'occasion de la voir répéter lors d'un voyage à Florence qu'il fit en 1644. Fidèle à son rôle d'informateur, il la fait connaître à ses nombreux correspondants, à Descartes, à Roberval, à beaucoup d'autres, et bientôt l'*expérience du vif-argent*, ou *expérience d'Italie*, fut célèbre en France et y fut l'objet de nombreuses discussions. Les uns expliquaient encore l'ascension du mercure par l'horreur du vide, horreur d'ailleurs limitée, d'autres par l'attraction des parois du tube sur le liquide, d'autres enfin, parmi lesquels Descartes, par la pression atmosphérique. Déjà, à partir de 1630, Descartes et aussi Mersenne admettaient que l'air est pesant. Dans un de ses derniers ouvrages, publié en 1647, Mersenne paraît se ranger à l'explication de l'expérience de Torricelli par la pression atmosphérique, et émet l'idée, que peut-être Descartes avait eue aussi, que si cette explication est exacte, la colonne de vif-argent doit être moins haute lorsque l'expérience est faite sur une montagne.

C'est Blaise Pascal qui allait réaliser cette expérience et, par la clarté de son esprit et de son style, jeter un jour nouveau sur toute la théorie des fluides.

La vie de Pascal appartient aussi bien à l'histoire littéraire ou à celle des mathématiques qu'à l'histoire à la physique. Rappelons seulement qu'il naquit en 1623 à Clermont où son père, homme d'une grande distinction et fort versé dans l'étude

des sciences, était président de la Cour des aides. On connaît son extraordinaire précocité, son *Traité des sections coniques* composé à seize ans, sa machine arithmétique, ancêtre à peine modifié des modernes machines à calculer, inventée à dix-huit ans, sa courte carrière scientifique brusquement interrompue par une crise de mysticisme religieux.

En 1644, Pascal habitait Rouen, où son père avait été envoyé comme intendant ; il eut connaissance de l'expérience de Torricelli par Petit, intendant des fortifications, qui, lui, la tenait de Mersenne. Petit et Pascal la répétèrent ensemble, et ce fut l'origine des recherches de Pascal. Au début, il s'attache à l'idée de l'horreur du vide, qu'il trouve limitée et non absolue ; il démontre en effet que les divers liquides restent suspendus à des hauteurs diverses, et que toujours, si le tube est assez haut, il reste du vide au-dessus du liquide. Le vide est donc possible.

Cependant, l'idée de la pression atmosphérique, que Torricelli lui-même avait introduite, commence bientôt à se faire jour, mais sans preuve bien définie ; il en fallait pour faire adopter sans conteste cette idée nouvelle. C'est alors que Pascal réalise la belle expérience dont Mersenne avait déjà publié le projet. On a beaucoup discuté pour savoir à qui l'honneur de cette idée devait être attribué. Il est bien probable que Pascal connaissait la publication de Mersenne (où d'ailleurs elle est comme noyée dans un bouillonnement d'idées confuses), et il est fort possible que Descartes y ait pensé le premier ; aussi bien, la question de priorité paraît-elle fort oiseuse ; il est plus intéressant de constater l'extrême activité du groupe français de philosophes et de savants, dont Mersenne était l'informateur et Descartes la plus haute intelligence, et où, parfois en dépit d'eux-mêmes, tous collaboraient au progrès de la science.

Il s'agissait donc de transporter le tube de Torricelli au sommet d'une montagne ; si la pesanteur de l'air est la cause qui maintient le mercure dans le tube, la colonne mercurielle doit être plus courte lorsque l'expérience est faite en un lieu élevé. Ne voyant pas le moyen de faire lui-même cette expérience, Pascal s'en ouvre à son beau-frère Périer qui, habitant Clermont, où il remplissait les fonctions de conseiller à la Cour des aides, pouvait facilement l'exécuter en montant au sommet de la montagne, qui domine la ville de plus d'un millier de mètres. L'expérience fut faite le 22 septembre 1648. Accompagné de plusieurs de ses amis, Périer gravit le Puy de Dôme, et y répète l'expérience de Torricelli ; la colonne de mercure n'a plus que 23 pouces 2 lignes, tandis qu'à Clermont, dans le jardin des pères minimes, elle se maintenait à 26 pouces 3 lignes et demie ; c'était donc une différence de 3 pouces une ligne et demie (un peu plus de 8 centimètres) entre les hauteurs

du mercure aux deux stations. Au retour, on s'arrêta en un point qui dominait Clermont d'environ 150 toises, et l'expérience fut faite de nouveau ; la hauteur du mercure fut trouvée de 25 pouces, intermédiaire entre celle du Puy de Dôme et celle de Clermont, et de un pouce 3 lignes et demie (environ 3 centimètres) inférieure à la hauteur trouvée à la ville. Ainsi, la théorie de la pression atmosphérique était pleinement confirmée. La hauteur de la montagne au-dessus de Clermont étant évaluée à 500 toises, l'abaissement de la colonne de mercure était d'une ligne (2 mm, 25) pour une élévation de 13 toises environ (25 mètres). Il n'était pas nécessaire d'aller bien haut pour constater un effet appréciable ; dès le lendemain, le père de La Mare, théologal de la cathédrale, demanda à Périer de répéter l'expérience en montant à la plus haute des tours de Notre-Dame de Clermont. « Pour satisfaire à la curiosité d'un homme de si grand mérite », dit Périer, l'expérience fut faite, et un abaissement de 2 lignes dans la colonne barométrique fut trouvé lorsque l'on transporta le tube au sommet de la tour, élevée d'environ 20 toises. Pascal lui-même eut la curiosité de répéter l'expérience à Paris ; entre le sommet et le bas de la tour Saint-Jacques, il trouva une petite différence dans la hauteur du mercure.

L'expérience du Puy de Dôme fut décrite, en 1648, dans une brochure ayant pour titre : « Récit de la grande expérience de l'équilibre des liqueurs, projetée par le sieur B. Pascal..., et faite par le sieur F. Périer, en une des plus hautes montagnes d'Auvergne, appelée vulgairement le Puy de Dôme. »

Un des mystères de l'hydrostatique était enfin éclairci, et la véritable signification de l'expérience de Torricelli établie. Le baromètre, comme on appellera bientôt le tube où est suspendue la colonne de vif-argent, donne la mesure de cette pression. En même temps, une des données importantes de la physique des fluides se trouvait précisée. A la suite du médecin périgourdin Jean Rey, Mersenne et avec lui Descartes avaient admis que l'air était pesant. On l'avait admis plutôt que démontré, car les essais de pesée directe de l'air avaient donné des résultats bien imparfaits. C'est ainsi que Descartes trouvait l'air cent quarante-cinq fois moins dense que l'eau ; nous savons qu'il l'est huit cents fois. L'expérience du Puy de Dôme montre que le mercure s'abaisse d'une ligne lorsqu'on s'élève de 13 toises ; le rapport de ces deux longueurs est environ 11000 ; l'air est donc onze mille fois moins dense que le mercure ou huit cents fois moins dense que l'eau. C'est seulement au dix-huitième siècle, après le développement de l'art de faire le vide, que l'air put être pesé d'une manière directe ; pendant un siècle, on vécut sur l'estimation, d'ailleurs fort exacte, résultant de l'expérience de Pascal ou d'expériences identiques.

Le baromètre devient rapidement célèbre ; de tous côtés on l'observe, et on s'aperçoit de ses variations en un même lieu. Pascal est l'un de ceux qui s'intéressent à ces changements et essaient de les relier aux conditions météorologiques. A sa demande, des observations suivies sont faites par Périer à Clermont, et pendant quelque temps à Stockholm par l'ambassadeur de France Chanut et par Descartes lui-même. Ce fut l'origine des observations météorologiques, et ce début fut décevant comme devait l'être pendant longtemps la science de l'atmosphère ; aucune règle simple ne put être formulée.

Bien d'autres appareils, connus depuis longtemps des praticiens, réclamaient une explication claire. Pascal montre le rôle de la pesanteur de l'air dans la théorie du siphon, dans celle des pompes, et varie les expériences destinées à montrer l'exactitude de son explication.

LA PRESSION DANS LES LIQUIDES Enfin, la notion même de pression dans les liquides était restée assez vague. Dans son petit *Traité de l'équilibre des liqueurs*, Pascal la précise et donne la loi si simple de la transmission des pressions en tous les points de la paroi. Le Flamand Stevin, dont Pascal ne paraît pas avoir connu les travaux, avait bien eu la notion de la pression exercée par le poids d'un liquide, mais non celle de la pression transmise dans un vase clos. Cette idée de la transmission des pressions se trouve dans Mersenne ; Pascal la reprend et l'énonce avec sa clarté habituelle : « Si un vaisseau plein d'eau, clos de toutes parts, a deux ouvertures, l'une centuple de l'autre : en mettant à chacune un piston qui lui soit juste, un homme poussant le petit piston égalera la force de cent hommes qui pousseront celui qui est cent fois plus large et en surmontera quatre-vingt-dix-neuf. » Pascal ajoute immédiatement : « D'où il paraît qu'un vaisseau plein d'eau est un nouveau principe de mécanique, et une machine nouvelle pour multiplier les forces à tel degré qu'on voudra, puisqu'un homme, par ce moyen, pourra élever tel fardeau qu'on lui proposera. » C'est, en quelques mots, le principe de la *presse hydraulique*, appareil qui ne put être pratiquement réalisé qu'à la fin du dix-huitième siècle, et qui rend de si grands services à l'industrie moderne.

LE VIDE Après l'expérience de Torricelli, après la belle démonstration donnée par Pascal, il n'était plus possible de douter de la pression atmosphérique ni du rôle important que joue l'air qui nous entoure dans les phénomènes les plus familiers. C'était tout un domaine nouveau ouvert à l'expérimentation ; toute la seconde moitié du dix-septième siècle est remplie par des recherches expérimentales,

rendues fort difficiles par l'imperfection des moyens, sur la pression de l'air, sur l'élasticité de ce fluide, sur les moyens propres à le comprimer, et surtout à le raréfier. Il s'en faut que les idées soient toujours parfaitement claires chez ces premiers chercheurs ; quelques-uns, sans connaître ce qui vient d'être découvert, retrouvent, moins clairement, ce que Pascal a énoncé ; d'autres entrevoient les applications de ces nouveaux phénomènes et commencent, avec des moyens rudimentaires, les expériences d'où devait sortir la machine à vapeur.

Pascal avait insisté sur l'existence du *vide* dans la « seringue » dont l'orifice est fermé et dont on retire, à grand'peine, le piston. C'est la même idée qui, bien peu de temps après, conduisit Otto de Guericke à trouver le moyen de vider un récipient ; la première machine à « faire le vide » était inventée. Il est remarquable que les propriétés des gaz n'aient été vraiment bien comprises qu'à partir du moment où l'on a su extraire le gaz d'un vase clos ; c'est par la comparaison entre le milieu qui nous entoure et l'espace privé d'air que les propriétés des gaz sont devenues claires. Dès lors, le rôle de l'air devient de plus en plus évident.

La nouvelle « pompe à air » fut bientôt connue dans toute l'Europe. L'Anglais Boyle entreprit une longue série d'expériences sur les différents phénomènes dans le vide, et pour cela perfectionna la pompe, très primitive, de Guericke. L'un des premiers, il eut une idée nette de l'élasticité des gaz et, en 1662, il publia pour la première fois des déterminations numériques destinées à faire connaître la loi de compressibilité de l'air. Boyle n'en déduit pas de loi générale, mais il a cependant le grand mérite d'avoir, le premier, expérimenté sur une question dont l'étude était difficile avec les moyens dont on disposait alors.

En France, ce ne fut qu'un peu plus tard, après la fondation de l'Académie, que les expériences sur le vide commencèrent à intéresser le monde savant. Huygens et son collaborateur Papin, que nous allons retrouver à propos de la machine à vapeur, furent des premiers à les répéter et à y ajouter quelque chose. Devenu en 1671 assistant de Huygens, Papin applique tout de suite son génie inventif au perfectionnement de la pompe à air, et publie en 1674 son premier ouvrage : *Nouvelles expériences sur le vide...* En le dédiant à Huygens, il écrit : « Les expériences sont à vous, puisque je les ay presque toutes faites par vostre ordre et suivant les directions que vous m'y avez données. » Presque à la même époque commencent les recherches de Mariotte qui lui firent retrouver un certain nombre de résultats, déjà énoncés avant lui ; il eut le mérite de les rendre indiscutables par des expériences à la fois simples et précises et de les exposer avec une admirable clarté.

MARIOTTE ET LA
MÉCANIQUE

Mariotte peut être considéré comme le fondateur de la physique expérimentale en France. On sait bien peu sur sa vie. Il naquit en Bourgogne, probablement vers 1720, embrassa l'état ecclésiastique et devint prieur de Saint-Martin-sous-Beaune. Il fut, dès sa fondation, l'un des membres de l'Académie ; il mourut en 1684. Presque toute sa carrière scientifique est consacrée à l'étude de cette partie de la physique qui touche à la mécanique et aux propriétés élastiques des gaz ; sans apporter de grandes idées nouvelles, il contribua très largement au progrès scientifique par la précision, la méthode qu'il apporta dans toutes ses expériences, la clarté qu'il sut mettre dans tous ses écrits. Son *Traité de la percussion ou choc des corps* (1676) donne des vues très justes et très fines sur un phénomène compliqué, qui servait depuis un demi-siècle d'exercice à tous les mathématiciens ; il l'étudie expérimentalement par des méthodes très simples, et ses résultats forment une des bases sur lesquelles s'appuie Newton pour fonder sa mécanique. Son *Traité du mouvement des eaux* est le premier ouvrage français sur l'hydraulique, science qui devait être si brillamment cultivée chez nous pendant tout le dix-huitième siècle, avec Pitot, Bélidor, Borda, Bossut, du Buat, sans compter les travaux mathématiques d'Alembert et de Lagrange. Mariotte, comme toujours, expérimente avec méthode, sans négliger les règles posées par les artisans, mais en cherchant à les préciser. Les travaux que l'on faisait alors pour amener l'eau à Versailles ne sont peut-être pas étrangers à ses recherches ; une partie de ses expériences sont faites en présence du prince de Condé, à Chantilly, « où l'abondance de l'eau et la hauteur des réservoirs lui fournissaient tous les moyens nécessaires ». Un traité moins étendu, en partie tiré du précédent, avait été composé pour être présenté à Louvois, sous le titre : *Règles pour les jets d'eau* ; on y trouve des règles extrêmement précises pour calculer la hauteur et le débit d'un jet d'eau.

L'ÉLASTICITÉ
DE L'AIR

La plus célèbre des recherches de Mariotte est celle qui est relative à l'élasticité des gaz et à la loi connue en France sous le nom de « loi de Mariotte ». Il est certain que Mariotte avait été, sur ce point, devancé par Boyle, et que l'oubli du nom du grand expérimentateur anglais est une injustice ; mais il faut reconnaître que Mariotte ajouta beaucoup à ce qu'avait laissé son devancier. Ses recherches sont décrites dans un livre intitulé *Essai sur la nature de l'air*, qui fait partie d'une série de petits traités sur divers sujets dont l'édition définitive est de 1679. Mariotte commence par faire ressortir l'importance de l'air dans la nature, malgré qu'il tombe à peine sous nos sens : « Les enfans et les

hommes grossiers ont bien de la peine à être persuadés de son existence, parce que, sa transparence le rendant invisible, ils se laissent facilement prévenir qu'il n'y a rien dans un vaisseau où l'on n'a versé aucune liqueur, ni mis aucun autre corps visible. On commence à s'en apercevoir par la résistance qu'il fait au mouvement des corps larges et peu épais, comme font les feuilles de papier ou l'aile d'un grand oiseau, et par le bruit qu'il fait en sortant de l'eau, lorsqu'on y plonge une bouteille ou une cruche vide. » Les expériences qu'il fit sur « le ressort de l'air » (nous disons aujourd'hui la pression) sont restées classiques ; elles furent réalisées avec « le sieur Hubin, qui est très expert à faire des baromètres et des thermomètres de plusieurs sortes » ; il est difficile de rien imaginer, sur cette question, de plus simple et de plus convaincant. La loi étant établie, Mariotte s'en sert pour résoudre plusieurs petits problèmes sur le volume que prend l'air dans un tube barométrique. Passant à un problème plus important, Mariotte cherche la loi suivant laquelle diminue la pression lorsqu'on s'élève au-dessus du sol. Le problème, posé d'une manière parfaitement correcte, dépasse un peu ses forces comme mathématicien ; il n'arrive à le résoudre que par des approximations, d'ailleurs très judicieuses. A la même époque, Huygens arrivait en quelques lignes de calcul à faire la petite intégration à laquelle on est conduit.

**L A MESURE DES TEMPÉRATURES ET
LES PROPRIÉTÉS DES FLUIDES**

C'est également dans la seconde moitié du dix-septième siècle que se précisera l'influence de la température sur les propriétés des fluides et, corrélativement, se perfectionneront les appareils propres à la mesure même des températures.

Rien n'est plus futile que de chercher à mettre un nom unique sur l'*invention* du thermomètre. L'idée de températures plus ou moins élevées est aussi vieille que le monde ; c'est par un progrès continu que, de cette notion vague, on est arrivé à la définition précise des températures, et ce progrès s'est continué jusqu'à nos jours. On peut cependant rapporter à Galilée et à son école les premiers appareils qui soient parvenus jusqu'à nous pour obtenir une indication numérique, encore très arbitraire, destinée à préciser la notion de chaud et de froid. Galilée, dans sa vieillesse, avait autour de lui quelques élèves qui, après sa mort, continuèrent son œuvre, et firent de Florence le centre scientifique le plus actif de l'Europe. Sous le nom d'*Accademia del cimento*, le grand-duc Ferdinand de Toscane, en 1657, fonda la première réunion scientifique régulièrement constituée ; cette Académie ne vécut que dix ans ; des raisons politiques la firent disparaître en 1667. Les académiciens devaient travailler en commun et publier leurs recherches collective-

ment, sans nom d'auteur ; ce sont à peu près les mêmes règles qui présidèrent à la fondation de l'Académie des sciences, par Colbert, en 1666.

Le travail en commun des académiciens de Florence a été, en grande partie, consacré à l'étude des propriétés des corps et de leurs changements avec la température ; ces recherches, c'est à la fois leur côté intéressant et leur point faible, sont strictement expérimentales, sans aucune tendance à l'explication théorique des résultats ; comme il arrive souvent, les disciples poussaient trop loin les tendances du maître. On trouve, dans les recherches des Florentins, l'étude des dilatations, la description d'un thermomètre à échelle arbitraire, des expériences sur la congélation de l'eau, une mesure fort exacte de la vitesse du son, et même un essai de mesure de la vitesse de la lumière qui eut au moins ce résultat de montrer que cette vitesse est extrêmement grande.

A la fin du dix-septième siècle, les propriétés thermiques des gaz et des vapeurs se précisent, au point que de divers côtés on aperçoit la possibilité de les utiliser pour la production de la force motrice. Avec le grand expérimentateur anglais Boyle, nous trouvons là, en France, les remarquables recherches d'Amontons et, dans sa vie errante, celles du Français Denis Papin.

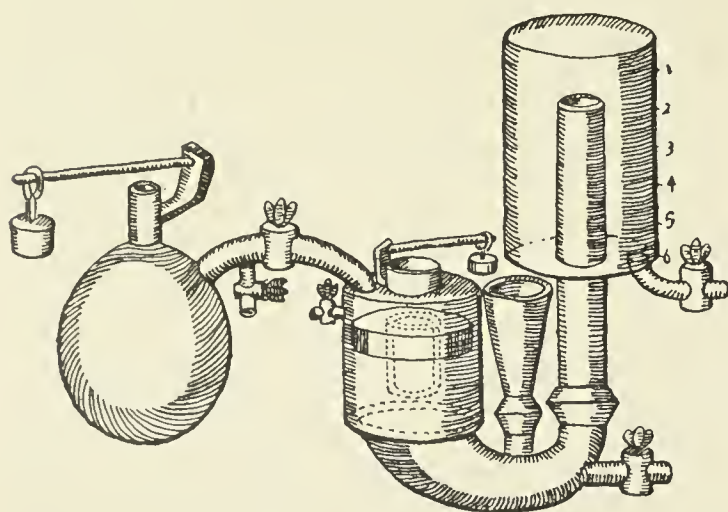
Amontons, né à Paris en 1663, mort en 1705, reste le type accompli du savant modeste et consciencieux, du bon expérimentateur, constructeur judicieux en même temps qu'habile ouvrier. La partie la plus importante de son œuvre est dans le perfectionnement des instruments pour la mesure des températures et dans l'étude des propriétés des gaz et des vapeurs. En 1695, il publie ses *Remarques et expériences sur la construction d'une nouvelle clepsydre, sur les baromètres, thermomètres et hygromètres*. En 1702, il décrit son « thermomètre à air », bien supérieur à tous les appareils alors employés, et déjà assez voisin des appareils actuels. Sur bien des points, en ce qui concerne les instruments de mesures, les idées d'Amontons se rapprochent beaucoup de celles des physiciens modernes ; il fait, par exemple, la distinction entre ce que l'on appelle aujourd'hui un *appareil absolu*, destiné à servir d'étalon, qui peut être délicat et peu transportable, et l'appareil d'usage quotidien, qui devra être comparé au premier. Son thermomètre à air lui servira d'appareil absolu, auquel il compare les autres instruments. Il a une première notion de ce que nous appelons le *zéro absolu*, et ses mesures, traduites dans notre échelle, le fixent à — 240 degrés (nombre qui n'est pas trop éloigné de la valeur exacte, — 273 degrés). Il étudie avec précision l'influence de la pression sur le point d'ébullition de l'eau. Dans un autre domaine, il découvre les premières lois du frottement des corps solides. Ses études sur les vapeurs l'avaient conduit à

voir clairement la possibilité de réaliser une « machine à feu » servant de moteur ; le but de son appareil est nettement indiqué par le titre même du mémoire qu'il publia en 1699 : *Moyen de substituer commodément l'action du feu à la force des hommes et des chevaux*. Sa machine paraît être restée à l'état de projet ; c'était justement l'époque où Papin obtenait ses premiers résultats.

LES MACHINES À FEU. PAPIN Dès cette époque, en effet, les propriétés des vapeurs, les effets de la pression atmosphérique et de l'élasticité des gaz, étaient assez connus pour que l'on pût songer à leur emploi dans la réalisation d'un moteur. L'état peu avancé de la technique en matière de constructions métalliques devait être une des principales causes des longs tâtonnements qui précédèrent cette réalisation ; quant à l'idée, elle devait être *dans l'air*, car elle paraît de tous côtés à la fin du dix-septième siècle. Dès les premiers temps de son séjour en France, Huygens avait pensé à la possibilité d'employer comme force motrice la pression atmosphérique, dont les effets lui étaient familiers. A cette époque, l'alimentation en eau du château de Versailles, bâti loin de toute rivière dans la région la plus sèche des environs de Paris, préoccupait tous les ingénieurs et donnait lieu à de nombreux projets ; l'aqueduc de Marly devait amener à Versailles l'eau de la Seine, mais il fallait d'abord élever cette eau à 150 mètres au-dessus du niveau de la rivière. C'est, très probablement, par cette question d'actualité que Huygens, venu en France sur les instances de Colbert, fut conduit à examiner le problème de la force motrice, dont la solution devait amener la grande révolution industrielle du dix-neuvième siècle. L'action de la pression atmosphérique sur un piston derrière lequel on a fait le vide était déjà bien connue ; pour obtenir ce vide, Huygens pense à deux moyens : l'un consiste à introduire dans le cylindre un peu de poudre, dont la déflagration chasse l'air par une ouverture qui se ferme aussitôt ; la pression atmosphérique pousse alors le piston avec une force que l'on utilise pour actionner une pompe ; l'autre méthode consiste à envoyer dans le cylindre de la vapeur d'eau dont la condensation produit le vide désiré. Huygens paraît d'ailleurs n'avoir pas poussé très loin les essais de réalisation de ses idées, réalisation pour laquelle il rencontra sans doute de grandes difficultés. En décrivant sa machine à poudre, il écrit : « J'ay imaginé pour cet effet la machine que je représente icy, laquelle je ne propose pas comme estant la perfection qu'on pourrait souhaiter, mais comme une pensée, qui ayant réussi en partie, pourra être poursuivie et peut-être perfectionnée... » Il confia ce perfectionnement à son jeune collaborateur, Denis Papin.

Né à Blois en 1647, Papin appartenait à une bonne famille protestante qui avait

fourni à l'État des serviteurs dévoués ; avant de venir à Paris, il avait pris à Angers le grade de docteur en médecine. En 1671, âgé de vingt-quatre ans, il fut désigné, probablement grâce à la protection de Colbert, pour assister Huygens dans ses expériences ; il était logé dans l'appartement même qu'occupait son maître, rue Vivienne, à la bibliothèque du roi, et devenait le confident de tous ses projets. Parmi les mille questions dont s'occupait Huygens (aucune branche des sciences ne lui était étrangère), ce dernier confia à Papin celle qui convenait le mieux à son esprit inventif : l'étude des propriétés élastiques de l'air et l'art de faire le vide. Nous avons vu que de cette collaboration sortit un perfectionnement important de la



MACHINE A FEU DE DENIS PAPIN

« pompe à vide ». En même temps, Huygens chargeait son élève de réaliser son moteur à poudre ; un appareil d'essai fonctionna devant Colbert, mais les expériences ne paraissent pas avoir été poursuivies. Dès 1675, Papin quitte la France, sans que nous sachions la raison exacte de ce départ. Sa qualité de protestant rendait-elle déjà sa situation peu sûre ? Ce qui est malheureusement certain, c'est qu'un peu plus tard, la révocation de l'édit de

Nantes devait disperser sa famille et lui interdire à jamais le retour dans son pays.

Papin reçut à Londres le meilleur accueil de l'illustre Boyle, dont il devint l'assistant comme il avait été celui de Huygens ; en 1680, il fut reçu membre de la Société royale de Londres, tout en étant chargé de la préparation des expériences faites devant cette académie. C'est pendant son séjour à Londres qu'il publie, en 1681, la description de son « digesteur », plus connu sous le nom de « marmite de Papin », appareil intéressant pour le physicien parce qu'on y voit de l'eau bouillir à une température plus élevée que son point d'ébullition habituel. En 1687, il quitte l'Angleterre pour aller habiter Marbourg où le landgrave Charles de Hesse, prince généreux et éclairé, lui avait offert une chaire de mathématiques à l'Université. Il y resta vingt années, pendant lesquelles, malgré la protection du landgrave, il paraît avoir eu une existence assez difficile ; il avait cependant mérité la haute estime de Leibniz, bien que, dans plusieurs discussions scientifiques, il ne se fût pas trouvé d'accord avec lui. C'est pendant son séjour à Marbourg que

Papin reprit ses expériences sur les machines à feu et les conduisit presque jusqu'à une réalisation pratique. En 1707, il quitte l'Allemagne pour retourner à Londres, où il retrouve près de la Société royale les fonctions de « curateur de ses expériences » qu'il occupait vingt ans auparavant. Il voyagea encore, mais on ne sait presque rien sur la dernière période de sa vie. Leibniz, s'informant un jour de lui, alors qu'il avait perdu sa trace, écrit : « Il a un mérite qui, certainement, n'est pas ordinaire. »

C'est du séjour de Papin à Marbourg que datent ses essais sur les machines à feu, continuation directe de ceux qu'il avait entrepris avec Huygens ; mais, au lieu de se servir de l'expansion des gaz par la poudre pour raréfier l'air du cylindre, il se sert de la condensation de la vapeur d'eau. A partir de 1690, il publie plusieurs mémoires, dans lesquels il n'est pas toujours facile de distinguer ce qui est simple projet et ce qui a été réalisé. Il semble bien cependant qu'en 1698, il ait construit une machine à feu qui élevait de l'eau. Sa dernière publication, imprimée en français à Cassel, en 1707, a pour titre : *Nouvelle manière de lever l'eau par la force du feu*. Il y explique que sa machine peut servir à faire tourner les moulins, et prend comme terme de comparaison, pour évaluer la puissance motrice disponible, les moulins à eau existant sur la Seine.

Mais, à cette époque, Savery en Angleterre avait déjà construit sa machine, qui élevait l'eau par la pression directe de la vapeur sur la surface du liquide ; il l'avait brevetée en 1698 et en avait publié la description en 1699 ; Papin ne l'ignorait pas, car dans son livre de 1707 il explique, non sans raison, les avantages de sa machine sur celle de Savery. Bientôt, Newcomen et Cayley, qui connaissaient les idées de Papin, allaient réaliser leurs premières machines, et dès 1715, leur pompe à feu était utilisée dans les mines d'Angleterre. C'est de là que la machine à vapeur nous vint, non plus sous forme de projet, mais comme machine industrielle ; avant le milieu du dix-huitième siècle la pompe à feu était employée pour le dessèchement des mines de Condé, en Flandre.

III

L'ACOUSTIQUE

MOUVEMENTS VIBRATOIRES ET ART MUSICAL

Il faut remonter à une très haute antiquité, peut-être jusqu'à Pythagore, pour trouver les premières notions exactes sur la cause et la nature du son et sur sa propagation. La pratique de l'art musical avait fait, peu à peu, découvrir un certain nombre de règles sur les rap-

ports entre les hauteurs des sons et les longueurs des cordes ou des tuyaux qui les produisent. A quel moment fut introduite en acoustique la notion de périodicité des mouvements et sa relation avec la hauteur ? Il est impossible de le dire ; on peut seulement constater que le lien entre période et hauteur est connu de tout le monde au dix-septième siècle. Il est clairement exposé par Galilée dans ses célèbres *Dialogues*, imprimés en 1638, mais composés et connus bien plus tôt. Un des plus importants ouvrages de Mersenne a pour titre : *Harmonie universelle* (1636) ; les sujets traités y sont très divers, mais l'acoustique y tient une grande place, et la notion de période y joue un rôle important. L'art des expériences était trop peu avancé pour que l'on pût compter les vibrations très rapides des cordes d'un instrument de musique ; Mersenne a l'idée ingénieuse d'étudier une corde assez longue et assez peu tendue pour que l'on puisse suivre de l'œil et compter ses vibrations, dont il découvre ainsi les lois, évidemment applicables aux vibrations plus rapides qui engendrent les sons.

VITESSE DE PROPAGATION La propagation progressive du son dans l'air était aussi connue des anciens ; elle est fort exactement décrite par Lucrèce. Mersenne, dans son *Harmonie universelle*, en donne une première détermination, dont l'exactitude laisse un peu à désirer, à la même époque, Gassendi remarque que, contrairement à l'opinion qui avait été parfois émise, tous les sons, graves ou aigus, se propagent avec la même vitesse. La mesure de cette vitesse, expérience assez facile lorsque l'on veut se contenter d'opérer dans l'air, sera reprise bien des fois ; en 1677, Cassini, Rømer et Picard font, aux environs de Paris, une détermination fort exacte. Après que Newton eut posé les bases d'une théorie mathématique de la propagation du son et essayé d'en calculer la vitesse, la détermination expérimentale de cette donnée prit une importance plus grande, encore accrue par le désaccord considérable qui existait entre le résultat du calcul et celui de l'expérience. C'est dans l'espoir d'expliquer ce désaccord que furent entreprises, au dix-huitième siècle, de nombreuses mesures de la vitesse du son, en particulier celles de Cassini de Thury, Lacaille et Maraldi en 1738 ; elles ne firent que confirmer le désaccord entre la théorie et l'expérience. Ce n'est qu'au début du dix-neuvième siècle, avec les travaux de Poisson et de Laplace, que l'explication de l'énigme fut enfin trouvée, conduisant à préciser une importante propriété des gaz utilisée plus tard dans la fondation de la thermodynamique.

Quant au rôle de l'air dans cette propagation, il ne devint parfaitement clair que le jour où l'on sut faire le vide ; car ce n'est que par comparaison avec les pro-

priétés de l'espace vide que l'on parvint à acquérir des idées exactes sur les propriétés des gaz. Otto de Guericke, le premier, constate que le son ne se propage pas dans le vide ; Papin, après avoir perfectionné la technique des pompes à air, refait cette expérience en 1685 devant la Société royale de Londres.

Puisque le son est dû aux vibrations d'un corps et à la propagation de ces vibrations à travers un milieu élastique, l'acoustique peut être considérée comme une branche de la science du mouvement. Ce lien est déjà clairement aperçu par les savants du dix-septième siècle, mais les problèmes posés étaient beaucoup trop difficiles pour eux. Ce n'est que dans la période suivante, après que Newton eut définitivement écrit les équations de la dynamique, que ces problèmes purent être abordés.

IV

L'OPTIQUE AU DIX-SEPTIÈME SIÈCLE

L'OPTIQUE DE Comme dans toutes les parties anciennes de la physique, la technique avait en optique de beaucoup précédé la science, et les premiers développements de la théorie furent surtout provoqués par le désir d'expliquer les résultats acquis par la pratique ; plus tard la théorie devait prendre les devants et donner à la technique les moyens de se perfectionner. L'usage des besicles était, depuis longtemps, universellement répandu alors que les livres ne contiennent, sur la marche des rayons lumineux, que des notions très imparfaites. L'invention des lunettes et celle du microscope ont été probablement fortuites ou tout au moins suggérées par des intuitions d'ouvrier et non par des calculs de savant ; elle remplit d'admiration les hommes instruits du commencement du dix-septième siècle, fut le point de départ des plus grandes découvertes astronomiques et biologiques, et marqua en même temps le début de l'optique scientifique. C'est, en effet, le désir d'expliquer le fonctionnement des lunettes qui conduisit Keppler à entreprendre son second ouvrage d'optique publié en 1611. C'est le même souci qui conduit Descartes à s'intéresser à l'optique. Son ouvrage capital sur cette science est sa *Dioptrique*, qui parut en même temps que le célèbre *Discours de la méthode*, en 1637, dont le titre exact était : *Discours de la méthode pour bien conduire sa raison et chercher la vérité dans les sciences. Plus la dioptrique, les météores*

et la géométrie qui sont des essais de cette méthode (Leyde, 1637). D'une admirable clarté d'expression, comme tous les ouvrages de Descartes, la *Dioptrique* doit être considérée comme ouvrant une ère nouvelle dans la science que nous appelons aujourd'hui l'optique géométrique, basée tout entière sur la notion de rayons lumineux et sur les lois qui régissent leurs déviations. Comme toujours, Descartes s'y révèle grand géomètre. Il est facile de remarquer que les idées théoriques sur la nature de la lumière y sont fort singulières et très loin d'être satisfaisantes ; le



RENÉ DESCARTES (D'après Frantz Hals).

peu de place que Descartes leur consacre semble indiquer qu'il n'y attachait pas une importance très grande, beaucoup moins grande peut-être que celle que les Cartésiens ont voulu y attacher. Le livre débute ainsi :

« Toute la conduite de notre vie dépend de nos sens, entre lesquels celui de la vue étant le plus universel et le plus noble, il n'y a point de doute que les inventions qui servent à augmenter sa puissance ne soient des plus utiles qui puissent être. Et il est malaisé d'en trouver aucune qui l'augmente davantage que celle de ces merveilleuses lunettes, qui, n'étant en

usage que depuis peu, nous ont déjà découvert de nouveaux astres dans le ciel, et d'autres nouveaux objets dessus la terre en plus grand nombre que ne sont ceux que nous y avons vu auparavant... Mais, à la honte de notre science, cette invention, si utile et si admirable, n'a premièrement été trouvée que par l'expérience et la fortune. »

C'est donc bien le désir de faire la théorie des instruments d'optique, pour ensuite les perfectionner, qui guide Descartes. Il juge cependant nécessaire de faire connaître son sentiment sur la nature de la lumière, et il le résume en disant que la lumière « n'est autre chose qu'un certain mouvement ou une action reçue en une matière très subtile, qui remplit les pores des autres corps ». Première ébauche de ce qui deviendra la théorie des ondulacions, première indication sur le rôle de

« l'éther » dont il sera si souvent question pendant plus de deux siècles. Mais l'ébauche est encore bien vague, et la théorie à peine utilisable. Descartes admet que la propagation de ce mouvement est *instantanée*, ce qui nous paraît absolument contradictoire avec l'idée même de la propagation de l'action à travers un milieu. Cette action, pour Descartes, peut aussi bien s'exercer des corps lumineux vers l'œil que dans le sens inverse, de l'œil vers les corps lumineux, et il prétend expliquer ainsi comment certains animaux, comme les chats, « peuvent voir dans les ténèbres de la nuit ». Sous une forme aussi vague, la théorie ne pouvait que rester stérile ; aussi Descartes n'y insiste-t-il pas autrement et n'essaie-t-il même pas de s'en servir pour expliquer le phénomène de la réfraction. C'est sur la loi géométrique de ce phénomène, et non sur une théorie, que tout l'ouvrage est construit.

Cette loi de la réfraction, c'est la célèbre « loi des sinus » qui permet de trouver l'orientation du rayon réfracté lorsque le rayon incident est connu. Cette loi, comment Descartes l'a-t-il découverte ? L'a-t-il empruntée au Hollandais Snell qui la connaissait certainement, mais qui ne l'a pas publiée ? Descartes a-t-il fait des expériences sur la réfraction, ou s'est-il servi des mesures faites par ses prédécesseurs ? Nous n'en savons absolument rien. Il essaie seulement de justifier la loi de la réfraction par un raisonnement dans lequel la propagation de la lumière est assimilée au mouvement d'un projectile qui traverserait une toile représentant la surface de séparation des deux milieux. C'est un point de vue inconciliable avec celui qu'il avait adopté d'abord, c'est un raisonnement basé sur la « théorie de l'émission », qui conduit à admettre que la lumière se propage d'autant plus vite que le milieu est plus dense. Sans plus s'occuper des principes, vraiment « inconcevables », comme dira plus tard Huygens, qui l'y ont conduit, Descartes va pouvoir donner libre carrière à son talent de géomètre pour déduire de la loi de la réfraction toute la théorie des instruments d'optique. La théorie de l'œil comme instrument d'optique est tout d'abord exposée en des termes auxquels nous n'aurions rien à changer. Passant ensuite à celle des lentilles, il va plus loin que ses devanciers et cherche quelle forme il faut donner aux surfaces pour que les rayons soient concentrés en un point d'une manière exacte. En d'autres termes, pour employer le langage de l'optique moderne, il cherche à annuler l'aberration de sphéricité. Il découvre les diverses formes possibles (lentille en forme d'ellipsoïde ou d'hyperboloïde), et c'est la première fois qu'un résultat géométriquement exact et non plus seulement approché est obtenu en dioptrique. Mais ici, le géomètre attache trop d'importance pratique à un élégant théorème. Voyant que l'on a donné aux verres de lunettes la forme sphérique au lieu de les tailler en hyperboloïde, il pense qu'un très grand avantage serait

obtenu si l'on pouvait réaliser la forme indiquée par la théorie. Il va jusqu'à imaginer une machine, dont il donne la description et le dessin, qui permettrait de tailler le verre en hyperbole ; sur ses conseils, son condisciple Mydorge, avec l'aide d'un certain Ferrier, essaie de réaliser l'idée qui doit conduire, pense-t-il, à un perfectionnement presque illimité des instruments d'optique. Aucun résultat utile ne fut ni ne pouvait être obtenu ; les déductions géométriques de Descartes étaient irréprochables, mais elles étaient bâties sur une donnée fautive ; la principale cause de l'imperfection des lunettes était non pas dans l'imperfection de la forme des verres, mais bien dans la décomposition de la lumière qui accompagne toute réfraction, phénomène qui ne devait être clarifié que cinquante ans plus tard par Newton.

Un des deux autres ouvrages publiés en même temps que *la Dioptrique*, *les Météores*, contient un important chapitre d'optique : Descartes y donne la théorie de l'arc-en-ciel. On avait compris depuis longtemps que ce phénomène était dû à la réfraction et réflexion de la lumière solaire dans les gouttes d'eau, mais il avait été impossible d'expliquer d'une manière précise ce double arc lumineux, dont le rayon angulaire est immuable. Pure question de géométrie, une fois la loi de la réfraction connue, question non sans difficulté pour les moyens dont on disposait alors. Descartes la résout d'une manière pleinement satisfaisante. Le calcul exige la connaissance de ce que nous appelons « l'indice de réfraction » de l'eau ; Descartes le prend égal à $\frac{250}{187}$ ou, dans notre système habituel de numération, 1,337, ce qui est une valeur très exacte. Le problème de maximum et de minimum est résolu non par voie algébrique, mais par une série de calculs numériques, et le résultat est à peu près rigoureusement celui que donne l'observation directe. C'était un beau succès, qui contribua probablement plus que tout autre à faire regarder comme exacte la loi de la réfraction admise par Descartes.

Il restait une importante lacune dans la théorie de l'arc-en-ciel : la formation d'un double arc brillant était bien expliquée, mais non les couleurs que présentent ces arcs. Descartes a bien vu que ces couleurs sont identiques à celles qui se produisent dans toute réfraction, et que la forme sphérique des gouttes n'est pas nécessaire à leur production ; il rappelle à ce propos l'expérience du prisme, et décrit presque complètement l'expérience qui servira de point de départ à Newton ; mais il n'arrive pas à en déduire la loi de décomposition de la lumière blanche en ses éléments simples. Au lieu d'interpréter directement l'expérience, il s'égare dans une explication par les propriétés de la « matière subtile ». Tant que la géométrie lui sert de guide, Descartes va droit au but ; dès qu'il s'abandonne à ses idées *a priori*, il devient,

comme dit Huygens, « inconcevable ». Ce n'est que cinquante ans plus tard que les couleurs de l'arc-en-ciel seront expliquées par Newton.

Les découvertes de Descartes, ses erreurs même allaient donner une vive impulsion aux progrès de l'optique, et cela dans deux directions. D'une part, de la discussion de ses idées théoriques allait naître une importante découverte, celle du principe de Fermat. D'autre part, la construction des instruments d'optique allait recevoir progressivement de très importants perfectionnements, qui devaient rejaillir sur les autres parties de la science, en particulier sur l'astronomie. Ces deux courants sont, finalement, utilisés par un même homme, Huygens, le plus grand peut-être et le plus universel des physiciens de tous les temps.

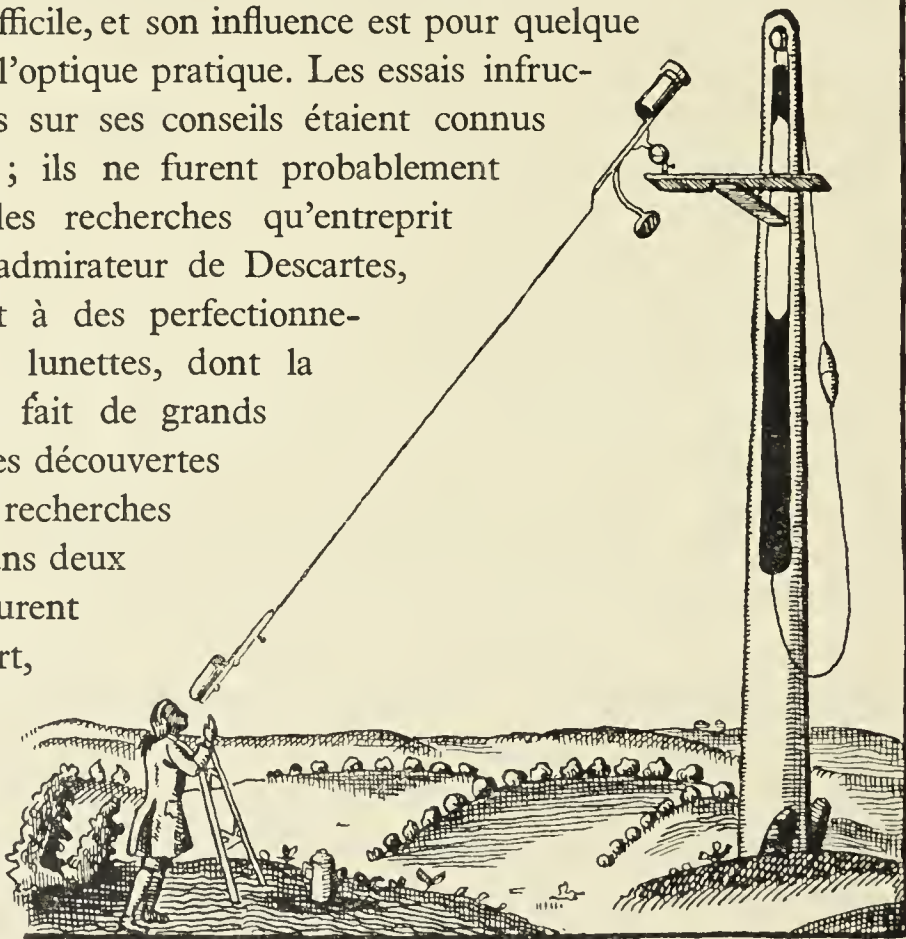
LE PRINCIPE DE FERMAT

Descartes, après avoir déclaré que la propagation de la lumière est instantanée, avait expliqué la réfraction de la lumière en admettant que la propagation est plus rapide dans l'eau que dans l'air. C'était, nous le savons aujourd'hui, une idée inexacte ; il y avait cependant dans l'affirmation de Descartes une indication fort importante : elle rattachait la réfraction à une inégalité de vitesse dans les deux milieux. A peine la *Dioptrique* était-elle composée que Fermat, grand mathématicien et digne rival de Descartes, en même temps que fervent disciple de Galilée, faisait remarquer qu'il paraissait plus vraisemblable de faire une supposition inverse de celle que faisait Descartes, et d'admettre que les milieux denses apportaient un retard dans la propagation de la lumière, et que par suite la lumière s'y propageait moins rapidement. Fermat, particulièrement versé dans les questions de maxima et de minima, chercha quel devait être le chemin suivi par la lumière pour que dans le temps minimum elle aille d'un point donné dans un milieu à un autre point d'un autre milieu séparé du premier par une surface plane. Il trouva que le chemin ainsi défini est justement celui que suit la lumière d'après la « loi des sinus », mais à la condition d'admettre que la vitesse est la plus faible dans le milieu le plus dense. Descartes s'éleva contre cette hypothèse, et il en résulta une très vive polémique qui finit par s'apaiser sans que la question ait pu être tranchée. Elle ne devait l'être d'une manière réellement certaine que deux siècles plus tard par la célèbre expérience, suggérée par Arago et exécutée par Foucault, sur la vitesse de la lumière dans l'air et dans l'eau. L'expérience donne raison à Fermat contre Descartes, et aux partisans de la théorie des ondes contre celui qui en avait donné la première ébauche. Les erreurs même de Descartes auront largement contribué au progrès de la science. Le « principe de Fermat », d'après lequel le chemin suivi par la lumière est celui qui correspond à la plus

petite durée de trajet, s'est trouvé parfaitement exact ; équivalant à la loi de la réfraction, il est souvent employé pour découvrir quelque propriété des rayons réfractés.

LE PERFECTIONNEMENT DES LUNETTES

Descartes, nous l'avons vu, s'était vivement intéressé au perfectionnement des instruments d'optique, dans lesquels il voyait le plus puissant moyen pour pénétrer plus avant dans la connaissance de la nature. Il ne semble pas qu'il ait, de ses mains, travaillé le verre ; mais il désirait que des hommes savants s'occupassent de cet art difficile, et son influence est pour quelque chose dans les progrès de l'optique pratique. Les essais infructueux qui furent entrepris sur ses conseils étaient connus de tout le monde savant ; ils ne furent probablement pas sans influence sur les recherches qu'entreprit bientôt Huygens, grand admirateur de Descartes, recherches qui aboutirent à des perfectionnements considérables des lunettes, dont la construction n'avait pas fait de grands progrès depuis l'époque des découvertes de Galilée. Le détail des recherches de Huygens est exposé dans deux ouvrages en latin, qui ne furent publiés qu'après sa mort, en 1703. L'un de ces ouvrages traite de la théorie des lunettes sous le titre : *Dioptrica* ; l'autre, exclusivement technique, est un véritable traité de l'art de tailler



LUNETTE SANS TUBE DE HUYGENS

les lentilles : *Commentarii de formandis poliendisque vitris ad telescopia*. Pendant tout le dix-huitième siècle et presque jusqu'à nos jours, ces deux livres ont été une mine de renseignements pour tous ceux qui se sont essayés dans l'art difficile où Huygens excellait. De son temps, bien que les deux traités n'eussent pas été publiés, tout le monde connaissait la construction de ses lunettes et les belles découvertes astronomiques qu'il avait faites. Dès 1655, il avait découvert un satellite de Saturne, un peu

plus tard l'anneau de cette planète, que Galilée avait seulement entrevu, puis la rotation de Mars, les taches sombres de la planète Jupiter, etc.

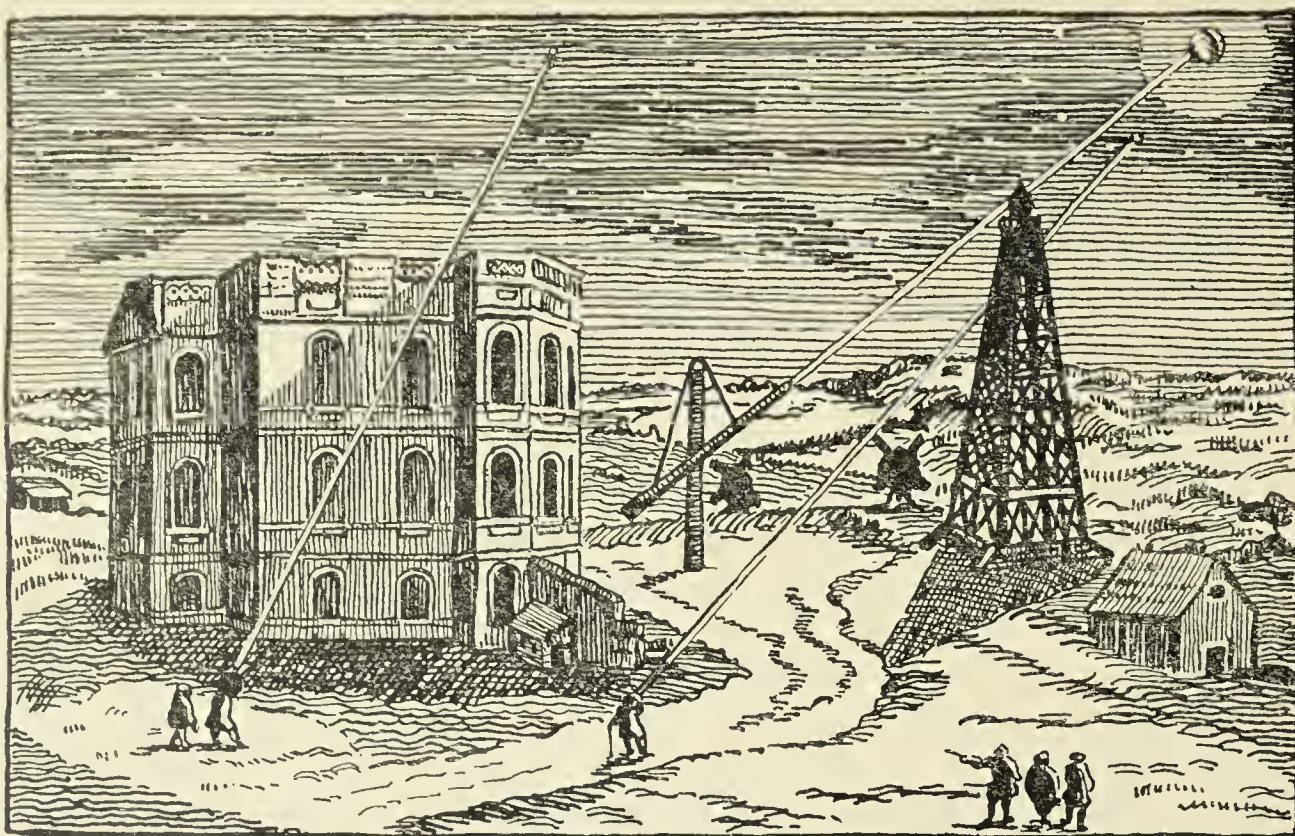
La nouveauté importante dans les lunettes de Huygens était la grande longueur de l'appareil ; nous savons aujourd'hui que c'était, en effet, le seul moyen de s'affranchir à peu près des aberrations de réfrangibilité avant la découverte des lentilles achromatiques, qui ne fut faite qu'un siècle plus tard. La lunette dont Huygens se servait pour ses études sur Saturne avait vingt et un pieds de longueur (environ 7 mètres), et seulement deux pouces (55 millimètres) d'ouverture.

La fondation de l'Observatoire donna une nouvelle impulsion au perfectionnement des lunettes. Cassini, en venant d'Italie, en avait apporté une de dix-sept pieds de long, construite par Campani, avec laquelle il fit des observations avant même que la construction de l'Observatoire fût achevée. Il s'en servit pour montrer à Colbert les taches du soleil, et le ministre ordonna aussitôt que l'on en commandât une plus grande au même constructeur ; peu de temps après, Campani envoya la lunette demandée, de trente-quatre pieds de long ; l'objectif lui fut payé mille écus. C'est avec ces instruments que Cassini découvrit deux nouveaux satellites de Saturne. Pour avoir mieux, on s'adresse encore aux Italiens, et Colbert utilise à plusieurs reprises l'entremise de l'ambassadeur de France à Rome, le cardinal d'Estrées, pour intervenir auprès des constructeurs.

Cependant, Colbert désirait que la construction des grandes lunettes fût entreprise en France. Déjà, quelques années plus tôt, Auzout avait réussi à tailler quelques bons objectifs ; il travaillait seul et faisait ses observations dans sa maison de l'île Saint-Louis, d'où il examinait, pour juger de la qualité de ses lentilles, des lettres qu'il faisait placer sur le clocher de l'église de Saint-Louis-en-l'Île. Ses efforts étaient restés isolés. A cette époque, plus encore qu'aujourd'hui, la fabrication de grands disques de verre exempts de défauts était la première difficulté de cette construction, et Venise en avait le monopole. Colbert avait fait créer une manufacture de glaces près de Cherbourg ; à deux reprises, il y envoya des ouvriers pour s'occuper de la fabrication des verres d'optique. Comme de nos jours, les fabricants de verre n'aimaient pas à faire connaître leurs secrets, et les envoyés de Colbert ne purent pénétrer dans la manufacture qu'après des ordres répétés du ministre. Quant à la taille des objectifs, plusieurs Français s'y employèrent, avec plus ou moins de succès, et l'on compara souvent, à l'Observatoire, les productions françaises avec celles des Italiens ; il en résultait de très vives discussions, particulièrement entre Cassini et un certain Pierre Borel, médecin du roi et membre de l'Académie. Borel prétendait avoir un moyen, qu'il gardait secret, pour tailler

des objectifs qu'il tenait pour supérieurs à tous les autres, et ne pouvait souffrir de contradiction sur ce sujet. Sur son *Journal d'observation* qu'il tint toute sa vie en latin, Cassini écrit un jour : *Querellæ D. Borelli in Academia vehementer me perturbant, ita ut per multos dies voluptatem observandi non senserim*. Ces querelles avaient du moins ce résultat de maintenir l'attention éveillée sur un problème important et difficile.

On a remarqué l'énorme longueur de ces lunettes, qui dépasse de beaucoup



LA TOUR DE MARLY A L'OBSERVATOIRE (D'après une gravure de Coquart. 1706).

celle de nos grands télescopes modernes. L'emploi d'appareils aussi longs, disposés d'une manière assez rudimentaire, n'allait pas sans de grandes difficultés. Jusqu'à quinze ou vingt pieds de longueur, on se servait de tubes de cuivre, de fer-blanc, ou même de carton et parchemin. Pour des appareils plus longs, on se contentait quelquefois de fixer l'objectif et l'oculaire aux deux extrémités d'une longue vergue, que l'on suspendait à un mât ; c'est pour suspendre de telles lunettes que l'on éleva, en 1679, un grand mât sur la terrasse de l'Observatoire. La manœuvre à la main de tels appareils, dont la longueur dépassait vingt-cinq mètres, devait être fort pénible.

Pour les longueurs encore plus grandes (Cassini en a employé dont la longueur atteignait quarante-cinq mètres), on avait pris le parti de supprimer complètement le tube. L'objectif était placé au sommet d'une tour et l'observateur, placé sur le sol, tenait l'oculaire sur un petit support ou même à la main ; on observait généralement l'astre au voisinage du méridien, après avoir calculé d'avance l'orientation à donner à l'objectif et la place de l'oculaire. En 1685, Cassini obtint de Louvois la permission de faire transporter à l'Observatoire l'immense tour en bois construite à Marly pour élever l'eau qui devait alimenter Versailles, et qui était remplacée depuis peu par une tour en maçonnerie ; sa hauteur était de cent vingt pieds ; le transport et la reconstruction de la tour, qui fut érigée dans le jardin avec un escalier qui en rendait l'accès facile, coûta dix mille livres ; le travail fut achevé en 1668. La tour de Marly resta à l'Observatoire jusqu'au milieu du dix-huitième siècle ; on s'en servit fort peu, car l'habitude d'employer des verres de très long foyer ne tarda pas à se perdre ; l'observation, avec ces instruments, était pénible et difficile, et il y fallait l'habileté et l'endurance de Dominique Cassini. Cinquante ans plus tard, la technique de ces appareils était complètement perdue, et les astronomes étaient incapables de voir plusieurs des astres que Cassini avait découverts ; le souvenir même de ces découvertes était presque perdu. L'invention des lunettes achromatiques par Dollond, en Angleterre, ne modifia guère cette situation, car les premiers instruments de cette espèce, déjà très parfaits, étaient trop petits pour montrer ce que l'on voyait avec les instruments du dix-septième siècle ; mais ces lunettes contenaient le germe d'un progrès qui ne devait porter tous ses fruits que plus tard. C'est en réalité avec les télescopes à réflexion, connus depuis longtemps, mais non sérieusement utilisés, que Herschel renoua la tradition interrompue des grands observateurs des premières années de l'Observatoire.

I NSTRUMENTS DE MESURE.

NAISSANCE DE LA MÉTROLOGIE L'art des observations, en physique aussi bien qu'en astronomie, n'exige pas seulement des instruments permettant de voir ce que l'œil humain ne peut atteindre directement ; il lui faut aussi des appareils permettant de traduire en nombres la position, les dimensions, la forme des objets observés. Au milieu du dix-septième siècle, ces instruments sont encore presque ceux qui étaient employés dans l'antiquité. C'est avec des cercles divisés en carton et par des visées à l'œil nu que l'on détermine dans le ciel la position des planètes et des étoiles ; l'instant d'un phénomène est donné non par une horloge, mais par le ciel lui-même, en déterminant la hauteur d'une étoile au moment où le phénomène se produit.

C'est au moment de la fondation de l'Académie, pendant la construction de l'Observatoire, que se produisit une véritable révolution dans l'art d'observer ; elle eut pour résultat de décupler immédiatement la précision des observations astronomiques, d'ouvrir la voie à toutes les observations modernes et de rendre possible toute une série de brillantes découvertes. L'idée, qui nous paraît bien naturelle, mais qui était alors si hardie qu'elle ne fut pas facilement acceptée par tous, était d'employer la lunette non plus comme simple instrument grossissant, mais aussi comme appareil propre à définir une ligne de visée ; en même temps, l'horloge à pendule était introduite pour la mesure du temps. Sur cette nouveauté, on ne peut pas mettre un nom unique ; ce fut l'œuvre collective du petit groupe de savants qui composaient le premier noyau de l'Académie, pendant les années voisines de 1666. Nous y retrouvons Auzout, savant modeste en même temps qu'habile artisan, auquel paraît due la première construction du *micromètre* destiné à mesurer les diamètres apparents des astres par la grandeur de l'image que donne l'objectif de la lunette ; l'abbé Picard, qui eut sans doute le premier l'idée d'adapter la lunette à l'instrument servant à mesurer les angles et qui s'en servit pour de belles observations d'astronomie et de géodésie ; Huygens, le plus grand homme de sciences de son temps, génie universel, qui intervient ici comme inventeur de l'horloge à balancier.

L'une des applications des nouvelles méthodes fut faite dans la mesure de la terre, entreprise par Picard en 1668, qui donna pour la première fois une évaluation exacte et certaine des dimensions de notre globe. Mesure dont on ne saurait exagérer l'importance, car elle marque à la fois le début de la géodésie moderne et de la science connue de nos jours sous le nom de métrologie ; l'une et l'autre de ces deux sciences allaient briller d'un vif éclat dans notre pays. Le détail des travaux de Picard appartient plutôt à l'histoire des mathématiques et de l'astronomie. Rappelons seulement que ces mesures avaient, pour la première fois, mis les hommes de science aux prises avec un problème précis de métrologie. Pour mesurer la terre, il fallait une unité de longueur ; on prit comme unité la « toise du Châtelet » qui, autant que cela avait un sens à cette époque, était considérée comme l'étalon fondamental de longueur à Paris. C'était une barre de fer, scellée dans le mur extérieur du grand Châtelet, terminée par deux saillies en retour d'équerre, entre lesquelles les règles représentant une toise devaient passer exactement ; c'est par ce moyen que furent ajustées les toises dont se servit Picard dans sa mesure. D'une construction médiocrement soignée, exposée aux intempéries et sujette à altération par l'usage même qu'on en faisait, la toise du Châtelet était un instrument encore bien imparfait, et ses imperfections n'avaient pas échappé à

Picard ; dès ce moment, l'idée qu'il fallait perfectionner l'étalon de l'unité de longueur vint à tous les esprits. Ce sont les « toises » construites au dix-huitième siècle pour les mesures de la terre, continuation directe de l'œuvre de Picard, qui servirent pendant longtemps d'étalons réels pour les mesures scientifiques, et même d'étalons légaux à partir de 1766. En même temps, l'idée venait qu'il serait possible de prendre une unité empruntée à quelque phénomène naturel, et par suite non susceptible d'être détruite. Picard, l'un des premiers, agita cette question, et suggéra l'emploi de la longueur du pendule battant la seconde. La question de l'unité naturelle fut fréquemment débattue pendant tout le siècle qui suivit ou pour mieux dire, elle ne fut jamais perdue de vue ; elle était mûre lorsque les circonstances permirent d'examiner, dans toute son ampleur, le problème des unités. Il n'est pas exagéré de dire que la question du « système métrique » date non pas du commencement de la Révolution, mais bien des mesures de la terre par Picard.

VITESSE DE LA LUMIÈRE Voici l'une des plus étonnantes découvertes du dix-septième siècle, conséquence indirecte, elle aussi, des recherches entreprises pour compléter la connaissance de la terre.

L'emploi, pour mesurer les longitudes, des éclipses des satellites de Jupiter exigeait que l'on pût prédire très exactement l'instant de ces phénomènes ; Cassini, aidé de Rømer, entreprit, pour servir de base au calcul de ces éclipses, une longue série d'observations qui dura plusieurs années. En essayant de trouver les lois qui régissent leur retour, Cassini et Rømer trouvèrent une irrégularité singulière qui était liée au rapprochement ou à l'éloignement de la terre par rapport à Jupiter. En calculant les éclipses au moyen d'une période constante, on trouvait que, progressivement, lorsque la planète se rapprochait de la terre, les éclipses arrivaient en avance sur l'heure prédite, et que l'écart atteignait au maximum environ un quart d'heure. Cassini ne put s'expliquer la cause de ce phénomène bien singulier, puisqu'il semblait montrer une influence de la terre sur un phénomène qui lui est absolument étranger ; il introduisit dans ses tables des éclipses une correction empirique. En 1676, Rømer eut l'idée vraiment géniale d'attribuer le retard à la durée de propagation de la lumière. La perturbation observée ne serait qu'apparente ; les éclipses se produiraient bien à intervalles réguliers, mais nous ne les verrions qu'un certain temps après leur production ; si notre distance à l'astre était toujours la même, cela n'altérerait en rien la régularité apparente des éclipses, mais comme notre distance varie, il en résulte un retard ou une avance selon que la distance augmente ou

diminue. Le quart d'heure de retard maximum représenterait le temps mis par la lumière à traverser l'orbite terrestre. La vitesse de la lumière s'en déduit immédiatement.

L'idée était extraordinairement hardie ; elle fut accueillie avec enthousiasme par les uns et violemment repoussée par les autres. Huygens l'adopta aussitôt, et elle ne fut pas sans influence sur le développement de sa théorie des ondes ; il y vit tout de suite la condamnation de l'idée de Descartes sur la propagation instantanée. D'autres, fidèles à cette idée, repoussaient l'explication de Rømer ; Cassini lui-même, dont les observations avaient contribué à la découverte de Rømer, ne considérait pas cette explication comme vraisemblable.

Quelques années plus tard, la découverte de l'aberration des étoiles par l'astronome anglais Bradley, phénomène que Picard avait aperçu, mais qu'il n'avait pas approfondi ni expliqué, vint donner une curieuse confirmation de la découverte de Rømer ; à partir de ce moment, personne ne douta plus de la propagation progressive de la lumière ni de l'énorme valeur de cette vitesse. C'est seulement au milieu du dix-neuvième siècle, avec les mesures de Fizeau et de Foucault, que l'on a pu la déterminer par des expériences directes et, renversant le problème, s'en servir pour évaluer avec précision les distances des astres. Cette vitesse est devenue, dans la science moderne, une des constantes fondamentales de la physique ; c'est à l'astronomie et indirectement à la géodésie que nous en devons la première détermination.

L E TRAITÉ DE LA LUMIÈRE DE HUYGENS

Dans tout cela, l'optique s'était surtout développée dans sa partie technique, comme moyen d'améliorer les procédés d'observation ; la théorie de la lumière ne tient qu'une place infime même dans l'œuvre de Descartes. Nous allons voir Huygens, admirable technicien de l'optique dans la première partie de sa carrière, devenir profond théoricien et fonder la théorie des ondulations.

C'est pendant son séjour en France qu'il composa son célèbre *Traité de la lumière* qui ne fut imprimé, en français, que plus tard, à Leyde, en 1690, suivi du *Discours sur la cause de la pesanteur*, écrit à la même époque. Dans la préface, Huygens nous apprend comment son traité fut composé : « J'escrivis ce traité pendant mon séjour en France, il y a douze ans ; et je le communiquay en l'année 1678 aux personnes sçavantes qui composaient alors l'Académie royale des sciences, à laquelle le roy m'avait fait l'honneur de m'appeler. »

L'importance du livre de Huygens peut être résumée en quelques mots. Il adopte la théorie des ondes, mais d'une image vague, presque purement verbale

que l'on trouve dans Descartes, il fait un instrument de recherches et de découvertes, en un mot une véritable théorie physique. Dès le début, il adopte comme démontrée la découverte de Røemer sur la vitesse de la lumière, découverte faite tout récemment à Paris et qui était loin d'être considérée par tous comme définitive. Donc, pour Huygens, la propagation est progressive, et non plus instantanée comme pour



CHRISTIAN HUYGENS
(D'après une gravure de G. Edelinck).

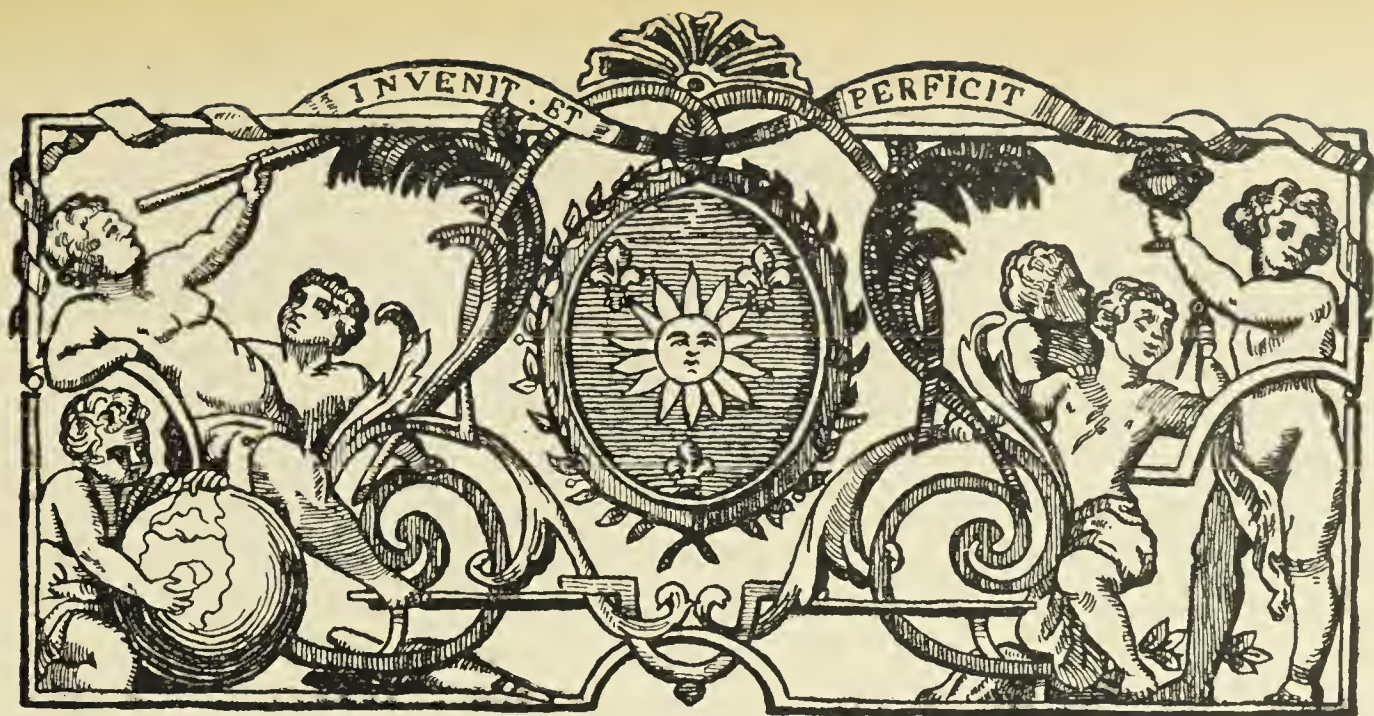
Descartes. Cela lui permet d'introduire la notion de « surface de l'onde », lieu des points où le mouvement parvient au même instant. La loi de la réfraction s'en déduit, à la condition d'accepter l'opinion de Fermat sur la vitesse dans les divers milieux et non celle de Descartes. L'importance de l'onde lumineuse, dans les problèmes d'optique géométrique, est mise en évidence par Huygens, en traitant les problèmes célèbres de Descartes sur les lentilles sans aberrations ; il retrouve avec la plus grande facilité les résultats dont Descartes n'avait pas publié de démonstration. Enfin, Huygens entreprend l'étude d'un phénomène alors tout nouvellement découvert, et qui devait jouer un grand rôle dans l'histoire de l'optique, le phénomène de la double réfraction du spath d'Islande.

Érasme Bartholin, professeur de mathématiques et de médecine à l'Université de Copenhague, avait décrit, dans un ouvrage publié en latin en 1669, les curieuses propriétés optiques d'un cristal rapporté d'Islande, et qui est resté connu sous le nom de « spath d'Islande ». Ce cristal, à la fois remarquable par sa belle cristallisation et par ses propriétés optiques, devait jouer un rôle important dans le développement de la cristallographie aussi bien que dans celui de l'optique ; un rayon lumineux qui le rencontre se dédouble, de telle sorte qu'un objet regardé à travers cette substance paraît dédoublé ; le spath d'Islande offre le premier exemple

d'un corps biréfringent. Huygens en entreprend l'étude au point de vue optique et, du premier coup, arrive à des résultats définitifs. Il distingue l'un de l'autre les deux rayons, l'un suivant les lois ordinaires de la réfraction et l'autre des lois complètement différentes ; appliquant toujours sa théorie des ondes, il aperçoit immédiatement que les propriétés étranges de ce rayon sont dues à ce qu'il ne se propage pas avec la même vitesse dans les différentes directions. Il arrive à deviner la forme de la « surface d'onde » correspondante, et montre comment on en déduit la marche du rayon dans tous les cas. Pas un mot n'est à changer dans l'expression de ces résultats, et ce n'est qu'avec Fresnel que quelque chose de vraiment nouveau sera ajouté à cette théorie.

Que manquait-il à la théorie des ondes de Huygens pour être vraiment complète ? Deux choses, mais fort importantes. Tout d'abord, la notion de mouvement périodique en est complètement absente. Pour Huygens, la lumière est bien due à une perturbation qui se propage, mais sur la loi de cette perturbation, il reste muet. Et cependant, entre l'époque où fut écrit le *Traité de la lumière* et celle où il fut imprimé, un événement important s'était produit : Newton avait publié, en 1687, la première édition de son *Optique*. Cet ouvrage contenait la découverte de la constitution de la lumière blanche et la notion de radiation simple ; en même temps, l'étude des couleurs de lames minces faisait apparaître la première indication de périodicité dans la propagation des phénomènes lumineux. Il aurait suffi de rapprocher ces indications de la théorie de Huygens pour achever la théorie des ondes ; il fallut attendre jusqu'au début du dix-neuvième siècle pour que fût accompli, avec Young et Fresnel, cet établissement définitif de la théorie des ondes, après plus d'un siècle pendant lequel les beaux travaux de Huygens se trouvèrent comme ensevelis sous l'oubli.

D'ailleurs, Newton n'eut d'abord pas plus de succès auprès de beaucoup de ses contemporains, qui ne comprirent pas la portée de ses expériences sur la décomposition de la lumière ; ce fut le cas pour Mariotte, dont les recherches sur les couleurs ne méritent pas d'être tirées de l'oubli. On doit, par contre, à ce dernier une découverte fort importante dans le domaine de l'optique physiologique, celle du *punctum cæcum*, ou tache aveugle de la rétine, au point où aboutit le nerf optique. Mariotte prétendait en conclure que le siège du sens de la vue n'est pas la rétine, mais bien la membrane choroïde sur laquelle la rétine est comme appliquée. Ce fut l'occasion d'une discussion courtoise entre Mariotte d'une part et d'autre part le grand anatomiste Pecquet et l'architecte médecin Perrault ; l'opinion de Mariotte dut être définitivement abandonnée.



CHAPITRE III

LA PHYSIQUE NEWTONIENNE

(LE DIX-HUITIÈME SIÈCLE JUSQUE VERS 1780)

- I. *Caractères de cette époque. La physique newtonienne. Peu de faits nouveaux. La physique expérimentale et le grand public. Les bons ouvriers. Application des mathématiques. — II. Les instruments de mesure et des propriétés des corps au dix-huitième siècle. La mesure du temps. Borda. Instruments pour l'étude des propriétés des corps. — III. L'optique au dix-huitième siècle. L'optique de Newton. La photométrie. Bouguer. — IV. Les débuts de la science de l'électricité et du magnétisme. Période ancienne. Les baromètres lumineux. Recherches de Du Fay. La mode des expériences d'électricité. Nollet. L'expérience de Leyde. Collection de petites découvertes. La foudre. Fin de la période des expériences qualitatives. — V. Le mouvement et la résistance des fluides. Variété des travaux sur cette question. Recherches mathématiques. Architecture hydraulique. Les lois de l'écoulement des fluides. La résistance des fluides. Le frottement interne ou viscosité.*

I

CARACTÈRES DE CETTE ÉPOQUE



la fin du dix-septième siècle se produisit un des événements scientifiques les plus considérables de tous les temps ; en 1687, Newton publia la première édition de ses *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*. Cet immortel ouvrage contient deux découvertes capitales : l'établissement définitif des équations de la dynamique et l'énoncé de la loi de l'attraction universelle.

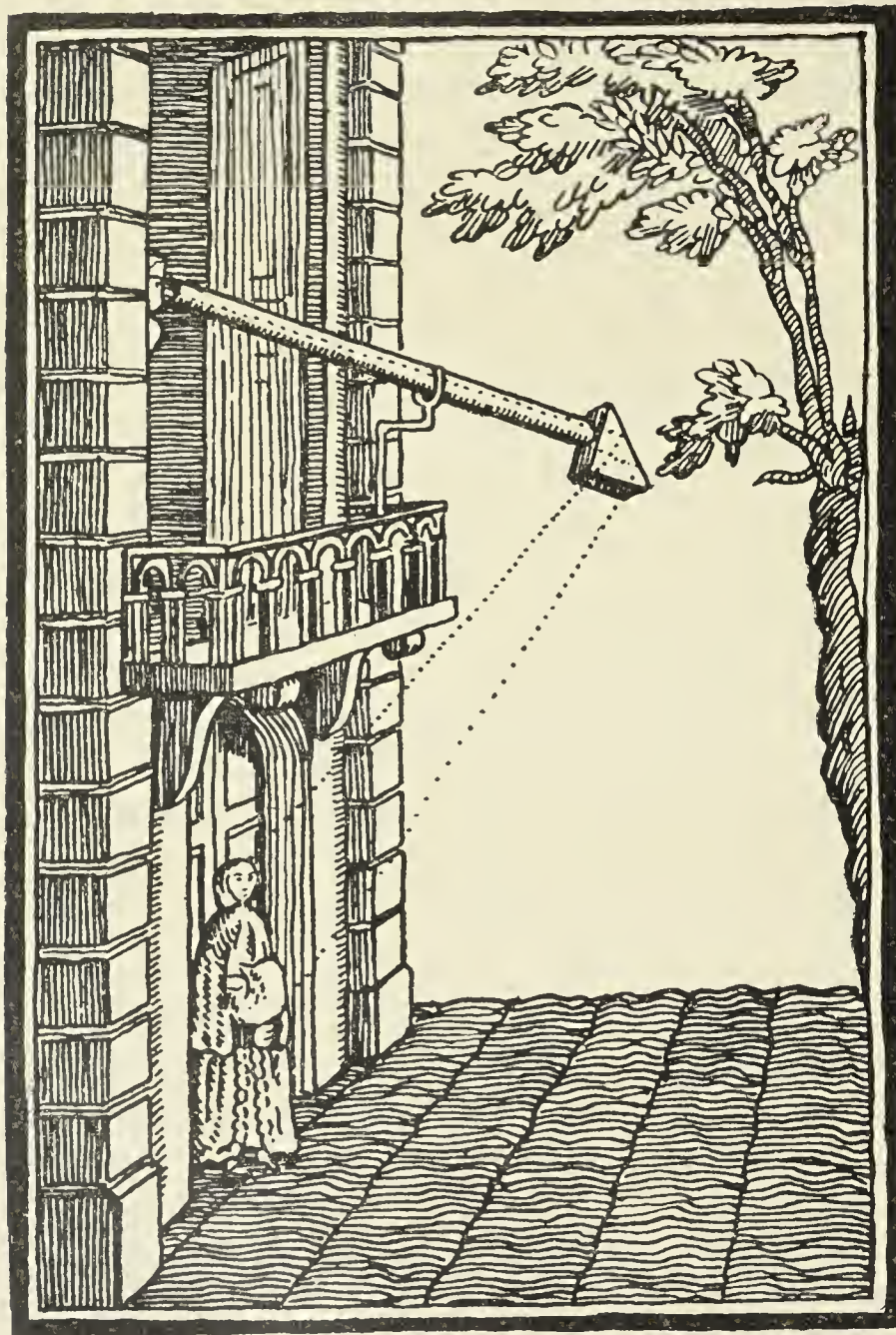
Les équations de la dynamique étaient l'aboutissement naturel des expériences de Galilée, des idées philosophiques, souvent erronées mais toujours importantes, de Descartes, des solutions données par Huygens et ses contemporains à un grand nombre de problèmes particuliers ; l'analyse de Newton fut peu discutée ; elle n'était accessible qu'aux seuls mathématiciens, et la plupart étaient assez informés de l'état de la science pour voir que Newton n'avait fait autre chose que préciser et généraliser ce que l'on savait avant lui. Quant à la loi de l'attraction, elle était plus inattendue ; Newton, sur ce terrain, avait bien eu des précurseurs isolés ; bien des physiciens s'étaient demandé jusqu'à quelle hauteur se fait sentir la pesanteur, ou suivant quelle loi elle peut décroître quand on s'éloigne de la terre ; mais sa généralisation hardie, appliquée à deux portions quelconques de matière, n'était certainement pas prévue ; elle ne fut pas admise sans résistance et ne fut même pas bien comprise par tous les savants. En disant que les planètes *sont attirées* par le soleil, que la lune *est attirée* par la terre, Newton ne faisait qu'énoncer *un fait* ; il aurait pu dire, comme il le fait dans un autre de ses ouvrages : « Je ne fais pas d'hypothèse. » En affirmant que cette attraction est *universelle*, qu'elle s'exerce entre deux portions quelconques de matière, il ne fait qu'une généralisation, très vraisemblable *a priori*, des faits observés. Beaucoup des contemporains de Newton, et particulièrement des physiciens français, ne virent pas les choses de ce point de vue réaliste ; il leur sembla, et ils avaient raison, que l'attraction universelle n'était pas une *explication*. Pour quelques-uns, c'était un retour à une sorte de propriété occulte incompréhensible ; ils ne virent pas que le *fait* découvert par Newton contenait en lui un nombre immense de faits qu'il reliait entre eux. Huygens lui-même, dont les recherches sur la mécanique avaient tant contribué à la fondation de la dynamique newtonienne, écrit à Leibniz, à propos du phénomène des marées que Newton rattache à l'attraction lunaire : « Pour ce qui est la cause du reflux que donne M. Newton, je ne m'en contente nullement, ni de ses autres théories qu'il bastit sur son principe d'attraction, qui me paraît absurde. » Ce n'est que peu à peu que l'idée put entrer dans tous les milieux scientifiques et cesser d'y être contestée ; et alors, avec les enthousiasmes de Voltaire, après la traduction signée par Mme du Châtelet en 1759, à laquelle le grand géomètre Clairaut n'était pas étranger, après les succès de la mécanique céleste, ce fut de l'enthousiasme pour ce que l'on appelait « la physique de Newton » ; il ne fut plus permis de douter que toute la physique dût être construite sur le modèle de la mécanique céleste. Ce fut le début des belles théories de la mécanique, et notre pays contribua plus qu'aucun autre à les mettre sous leur forme définitive. En même temps, les mathématiques avaient reçu de

Newton et de Leibniz les outils nécessaires pour développer ces théories ; les progrès de l'analyse mathématique et ceux de la mécanique théorique se poussent l'un l'autre, l'instrument se perfectionnant par son emploi même dans de nouveaux problèmes. C'est l'époque où Clairaut commence la théorie de la forme des planètes, où d'Alembert, généralisant les idées de Newton, donne une forme nouvelle aux équations de la dynamique, perfectionne la mécanique céleste et trouve les équations du mouvement des fluides, où Lagrange enfin écrit sa *Mécanique analytique* qui contient dans un admirable exposé tout ce qui avait été obtenu.

PEU DE FAITS NOUVEAUX Il est très remarquable que cette belle époque scientifique ne soit presque marquée, en physique, par aucune découverte importante. C'est une période de mise au point, de consolidation des résultats déjà acquis et de préparation de la période suivante. Ce sont les branches de la physique touchant directement à la mécanique qui, seules, profitent réellement de la grande œuvre de Newton. L'acoustique devient une branche de la mécanique ; des théories mathématiques peuvent être édifiées pour expliquer les vibrations des cordes et des tuyaux sonores, plus tard des tiges et des plaques vibrantes ; presque tous les mathématiciens s'appliquent à ces problèmes, dont l'intérêt est surtout de fournir un aliment concret à leurs spéculations. Les plus grands noms de la science mathématique, Bernoulli, Euler, d'Alembert, Lagrange, plus tard ceux du dix-neuvième siècle et de la période contemporaine sont ainsi liés aux problèmes d'acoustique. Mais l'étude des phénomènes calorifiques ne fait presque aucun progrès ; l'optique est comme figée dans l'admiration de l'œuvre newtonienne, qui n'est même pas parfaitement comprise, et les belles idées de Huygens sont comme oubliées. Les découvertes les plus importantes (bien que les contemporains ne s'en doutassent probablement pas) étaient celles qui étaient faites dans le domaine de l'électricité ; c'est, en effet, dans la partie moyenne du dix-huitième siècle que les faits les plus importants de l'électrostatique sont découverts et commencent à être classés. Les savants à formation mathématique, ceux que l'on regarde avec raison comme les grands esprits de l'époque, demeurent à peu près étrangers à cette branche naissante de la physique, qui reste sur le domaine purement expérimental, et qui est encore, jusqu'à un certain point, une science d'amateurs, parfois même une science de salons.

LA PHYSIQUE EXPÉRIMENTALE ET LE GRAND PUBLIC Car l'époque dont nous parlons est celle où la physique expérimentale commence à intéresser le grand public, on pourrait même dire à devenir à la mode. Pendant que les mathé-

maticiens développent l'œuvre de Newton, des hommes d'un esprit plus modeste répandent le goût de l'expérience et la curiosité vers les phénomènes physiques.



POLÉMOSCOPE
(D'après le *Traité de physique* de l'abbé Nollet).

En 1753, l'abbé Nollet inaugure, au Collège de Navarre (sur l'emplacement où est maintenant l'École polytechnique), un enseignement de « physique expérimentale » ; le succès est si grand qu'il faut bientôt construire un amphithéâtre spécialement disposé pour les cours. Nollet avait déjà le titre de « maître de physique et d'histoire naturelle des enfants de France » ; le dauphin, fils de Louis XV (mort en 1765), puis le petit-fils de Louis XV (plus tard Louis XVI) furent ses élèves. Plusieurs seigneurs de la cour eurent leur cabinet de physique, où ils rassemblaient de beaux appareils, et souvent aussi des collections de curieux échantillons de minéraux. La plupart de ces hommes (non pas tous cependant) n'étaient

pas en état de suivre les hautes spéculations mathématiques ; ce qui les intéressait, c'étaient des expériences bien claires, réalisées avec des instruments soigneusement construits par de bons ouvriers, parfois même de leurs propres mains. Il suffit de

voir quelle place tiennent les descriptions des métiers dans les ouvrages, comme l'*Encyclopédie*, destinés au public éclairé, pour deviner que ce public s'intéressait vivement à la manière de travailler des artisans. Les ouvrages de l'abbé Nollet,



JEAN RUAUX
Émailleur du roi.

qui eurent un immense succès, sont surtout consacrés à la description des divers appareils et à l'art de les construire. Ses *Leçons de physique expérimentale* en six volumes eurent neuf éditions entre 1743 et 1784 ; un autre de ses ouvrages, publié en 1770, a pour titre : *l'Art des expériences, ou avis aux amateurs de la physique sur le choix, la construction et l'usage des instruments*. On peut donner de nombreux exemples de l'intérêt que les gens du monde, et même les hauts personnages, prenaient aux travaux manuels. Dans ses leçons de physique expérimentale, après avoir donné les détails les plus précis sur l'art de travailler le verre, art encore de nos jours indispensable aux expérimentateurs, Nollet écrit : « Jean Ruaux, émail-

leur du roi, a eu l'honneur d'amuser par son travail presque tous nos princes dans leur jeunesse, et d'en donner des leçons à beaucoup de seigneurs, tant français qu'étrangers ; son portrait fut esquissé par un officier de la cour de Mgr le dauphin, tandis qu'il travaillait devant ce prince en 1739. C'est d'après cette esquisse que j'ai fait graver la figure. »

LES BONS OUVRIERS On pourrait multiplier à l'infini les exemples d'hommes considérables qui ne croyaient pas déroger en s'intéressant au travail manuel appliqué à l'étude de la physique. Le duc de Chaulnes s'intéressait vivement aux instruments d'optique ; dans une magnifique publication de 1768, il a donné la description détaillée, allant jusqu'à ce que nous appellerions les « dessins d'exécution » de son microscope (dont la partie optique venait probablement d'Angleterre),

ainsi que d'une nouvelle machine à tracer les divisions des instruments de mesure.

Bochart de Saron, premier président du Parlement de Paris, était à la fois un excellent calculateur et un habile travailleur manuel. Coulomb ayant désiré étudier la distribution de l'électricité sur un conducteur en forme d'ellipsoïde, ce fut de Saron qui construisit, de ses mains, la pièce ayant exactement la forme désirée.

Louis XVI lui-même était un habile travailleur manuel ; il prenait intérêt au travail des métaux, plus peut-être qu'aux affaires de l'État, et les leçons de l'abbé Nollet, qu'il avait reçues dans son enfance, n'étaient probablement pas étrangères à ce goût.

En dehors des établissements scientifiques entretenus des deniers de l'État, l'Observatoire (tombé dans une singulière décadence), le Jardin du roi, Louis XVI avait, lui aussi, son cabinet de physique particulier, au château de la Muette, dirigé par l'abbé Rochon ; il y fonda, sous la même direction, un institut d'optique, destiné à contribuer au perfectionnement des instruments d'optique dont la construction était un peu délaissée en France.

Sans doute, les amateurs d'expériences du dix-huitième siècle, y compris l'abbé Nollet, apportèrent en physique peu d'idées nouvelles ; leur rôle n'en fut pas moins important. La science de l'électricité leur doit beaucoup, et dans la période suivante Coulomb n'aurait sans doute pas songé à appliquer sa balance de torsion à l'étude quantitative des actions électriques si les expériences d'électricité, parfois sous une forme un peu enfantine, n'avaient été mises à la mode quelques années avant. D'ailleurs, même en répétant des expériences connues, il est rare qu'on ne leur ajoute pas quelque chose, et il n'est pas indifférent que le mouvement scientifique d'une époque soit suivi, même de loin, par tout le public éclairé. Enfin, le dix-huitième siècle aura été chez nous, dans tous les genres, l'époque des bons ouvriers ; il n'était pas indifférent que l'habileté de quelques-uns d'entre eux fût tournée vers la construction scientifique, et ce sont ces bons ouvriers qui, dans la période suivante, purent réaliser des prodiges. Lorsque l'on eut besoin, pour établir les bases du système métrique, d'instruments très précis pour mesurer les longueurs et les poids, on eut sous la main les praticiens habiles dont le concours était nécessaire, comme les créateurs du « style Empire » trouvèrent, pour réaliser leurs idées, les bons artisans du « style Louis XVI ». En tenant compte de cette habileté, on s'étonnera moins de voir, en 1784, le physicien Charles qui était, comme Nollet, l'homme d'un « cabinet de physique », transformer en quelques semaines le sac en papier lancé dans les airs par le génie des Montgolfier en ballon sphérique, gonflé d'hydrogène, et muni de tous ses accessoires, à peu près identique à l'aérostat moderne.

APPLICATION DES MATHÉMATIQUES

Quant aux applications des mathématiques à la physique, en dehors de ce qui touche à la mécanique, elles restent encore peu étendues dans la période qui nous occupe ; mais on peut dire que ces applications se préparent pour la période suivante par l'apparition de ceux que l'on peut appeler déjà les ingénieurs mathématiciens. Jusque-là, en effet, les parties les plus élevées des mathématiques étaient restées surtout un objet de spéculation ; les techniciens, quelle que fût leur spécialité, hydrauliciens, constructeurs de routes ou bâtisseurs d'édifices, marins ou ingénieurs militaires, n'en avaient guère besoin, et d'ailleurs les mathématiques un peu rigides de leur temps ne leur auraient été que d'un faible secours. C'est pendant le dix-huitième siècle que, peu à peu, nous voyons naître ce personnage nouveau, ascendant direct de l'ingénieur moderne, le technicien qui sait appliquer les mathématiques aux problèmes de son art. Il apparaît d'abord d'une manière sporadique, parfois extrêmement brillante ; c'est Bouguer, professeur d'hydrographie, qui dans ses moments de loisir fonde la science de la photométrie et c'est le chevalier Borda, officier du génie, qui connaît à fond les mathématiques de son temps et les applique judicieusement à tous les problèmes qu'il rencontre ; sa maîtrise est si évidente, les services qu'il peut rendre sont si importants qu'on l'utilise successivement, en dépit des préjugés de corps, dans les métiers les plus divers : génie militaire, navigation, constructions navales, travaux hydrauliques. L'utilité d'une formation scientifique pour les besoins des services de l'État devient bientôt si évidente que l'on crée des écoles spéciales pour le recrutement de ces services, et les mathématiques tiennent une large place dans leur enseignement. Ainsi se forme la plus grande partie du personnel scientifique qui devait illustrer le début de la période suivante. En 1750 est créée à Mézières l'École du génie militaire, d'où devaient sortir un grand nombre d'hommes du premier ordre. On y recevait chaque année vingt élèves ; les jeunes gens dont la famille n'était pas noble ne pouvaient être admis qu'après une enquête sévère sur leurs antécédents. Monge, fils d'un marchand forain, ne put entrer que dans une sorte d'école de seconde classe, où l'on formait des praticiens, mais il se fit si bien remarquer par ses talents qu'il devint bientôt après professeur à l'École des officiers. De cette école sortirent Coulomb, Borda, Carnot, Meusnier, le fondateur de la science aéronautique, le grand hydraulicien du Buat ; Malus fut reçu dans la dernière promotion, en 1792, quelques jours avant la suppression de l'établissement.

En 1747, Trudaine, le constructeur des belles routes de la région parisienne, fait créer l'École des ponts et chaussées, dont le premier directeur fut le célèbre

ingénieur Perronet, assisté du grand hydraulicien Chézy, à qui succéda, sous le Consulat et l'Empire, le mécanicien de Prony.

L'École de construction navale fut créée un peu plus tard, et l'influence de Borda y fut prépondérante.

Les autres écoles militaires furent plusieurs fois remaniées dans les années qui précédèrent la Révolution ; plusieurs des savants les plus célèbres de l'époque, entre autres l'illustre Laplace, y exercèrent leur influence comme professeurs ou comme examinateurs.

On peut faire dater la période suivante de l'époque où, vers 1780, les hommes sortis de ces écoles entrent en scène, apportant dans l'étude de la physique leur habitude de raisonner mathématiquement sur des réalités concrètes, et transformant l'étude qualitative et descriptive des phénomènes en étude quantitative et numérique. Ce sont ces mêmes hommes qui, pendant la Révolution, mènent le mouvement scientifique et, systématisant, peut-être à l'excès, les méthodes de l'enseignement qu'ils ont reçu, fondent l'École polytechnique, nouvelle quant à l'esprit politique, mais suite directe de celles de l'ancien régime quant à l'enseignement. L'École polytechnique, à son tour, fournit presque en entier le personnel scientifique français de la première moitié du dix-neuvième siècle qui se trouve ainsi directement rattaché, en dépit des révolutions politiques, au mouvement scientifique du dix-huitième.

II

LES INSTRUMENTS DE MESURE ET LES PROPRIÉTÉS DES CORPS AU DIX-HUITIÈME SIÈCLE

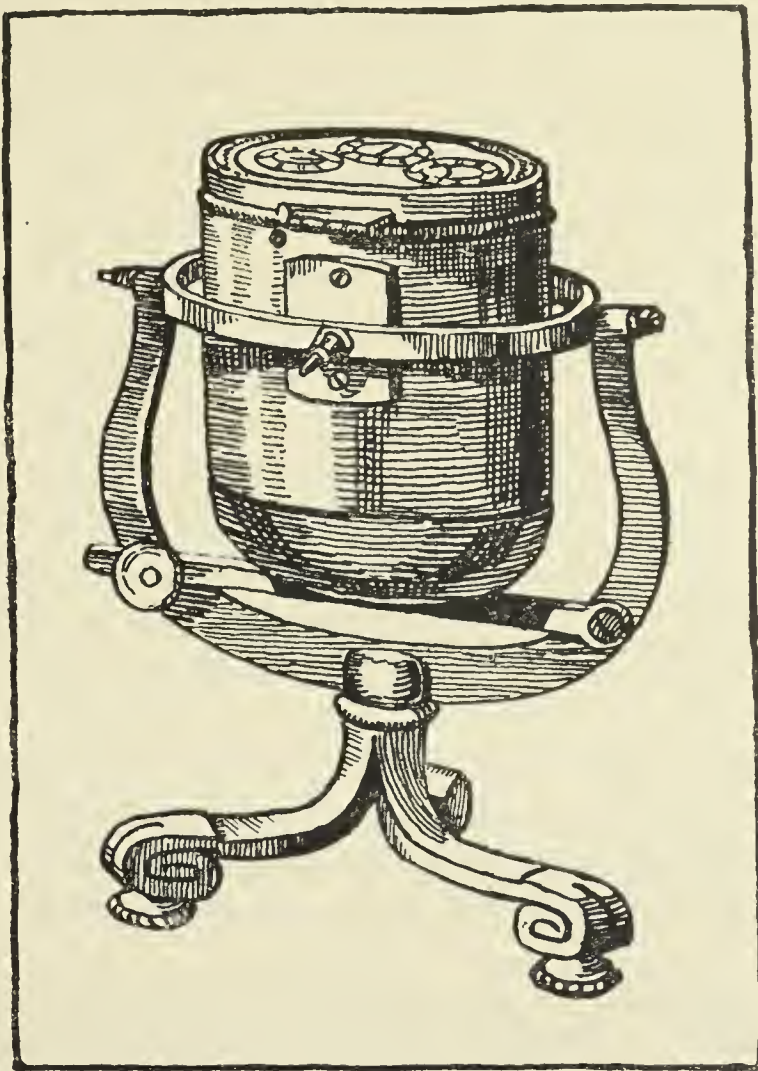
LA MESURE DU TEMPS L'astronomie et la géodésie avaient, dans la seconde moitié du siècle précédent, mené tout le mouvement scientifique ; c'est par l'étude du ciel et de notre planète que l'on s'était accoutumé à la recherche des valeurs numériques précises, c'est pour cette étude que l'on avait perfectionné les instruments de mesure et étudié les lois de l'optique, c'est par elle que commence la physique newtonienne.

Au dix-huitième siècle, cette influence de l'astronomie sur la physique se continue, et contribue largement au perfectionnement des instruments ; mais en même temps la physique commence à acquérir ses propres instruments de travail.

Deux des grands problèmes qui occupèrent le plus régulièrement les observateurs du dix-huitième siècle, le problème de l'aplatissement terrestre et celui de la mesure des longitudes, appartiennent surtout à l'histoire des mathématiques et de l'astronomie. Ils furent cependant l'occasion d'importants perfectionnements dans les instruments de mesure : appareils pour la mesure des angles, appareils pour la mesure du temps.

Le problème de la détermination des longitudes, aussi ancien que les grands voyages de navigation, s'est immédiatement confondu avec le problème de la détermination ou de la conservation de l'heure du lieu pris comme origine. Dès le début du seizième siècle, les deux seuls procédés possibles avaient été imaginés. L'un, purement astronomique, est basé sur l'observation d'un phénomène céleste visible du monde entier et dont l'instant, prévu d'avance, donne en tous les lieux de la terre la concordance des temps ; l'autre consiste à emporter avec soi une horloge qui ne cesse de marquer l'heure du point de départ.

La première méthode, à laquelle se rattache une longue série de recherches sur les éclipses des satellites de Jupiter et sur le mouvement de la lune est entièrement du domaine de l'astronomie. La seconde a été l'origine du perfectionnement des horloges et chronomètres et a eu une importante répercussion sur le progrès de la construction des instruments de précision et même de la construction mécanique en général ; c'est à ce point de vue surtout qu'elle est intéressante pour l'histoire de la physique. Les recherches théoriques sur le pendule, les longues études des horlogers Sully, Leroy, Berthoud en France et Harrison en Angle-



MONTRE A LONGITUDE DE BERTHOUD.

terre, de nombreux voyages scientifiques où le nom de Borda revient constamment et où le problème des longitudes sert d'occasion au perfectionnement de toute la technique des observations et au développement de nos connaissances en géographie, telles sont les conséquences d'un siècle d'efforts sur un problème particulier. Les résultats dépassent même de beaucoup le domaine de la physique et de l'astronomie. D'une manière beaucoup plus générale, l'industrie si délicate de l'horlogerie avait obligé les techniciens à résoudre le problème de la construction métallique précise et robuste, et ce fut, avec l'invention de la machine à vapeur, le début de la grande révolution de l'industrie. C'est des ateliers des horlogers que sortirent les premières machines précises à travailler les métaux ; ce sont des horlogers qui inventèrent les premiers métiers à filer, qu'il eût été impossible de réaliser avec les anciens procédés de construction utilisant surtout le bois. Un problème d'astronomie et de géodésie est ainsi lié à la profonde transformation de la vie moderne.

L A MESURE
DES ANGLES

Il ne suffit pas d'une bonne montre pour déterminer la position d'un navire ; il faut encore observer les astres, et pour cela faire des mesures d'angle en dépit des mouvements de roulis. Les instruments en usage dans les observatoires ne sont pas utilisables dans ces conditions. Dès 1730, les Anglais avaient répandu l'usage du sextant dont l'idée, plus ancienne, venait également de chez eux ; c'est en Angleterre que tous les marins se procuraient ces instruments. En 1771, à propos d'un de ses voyages scientifiques, Borda perfectionna le sextant en le transformant en « cercle à réflexion » ; il rendit en même temps un grand service à son pays en guidant un habile artiste, Lenoir, dans la construction, fort délaissée en France, des appareils de mesure et en particulier des cercles divisés.

B ORDA

On vient de voir quel lien étroit unit, au dix-huitième siècle, la science pure avec la géographie et l'art de la navigation ; cette dépendance est, en quelque sorte, symbolisée par un homme, dont le nom est souvent revenu dans ce qui précède et reviendra dans la suite, qui embrassa à lui seul toutes les formes de l'activité scientifique de son temps, qui fut en tout un innovateur, souvent un précurseur, en même temps qu'un grand homme d'action. Quelques lignes sur cette belle existence préciseront les conditions de la vie scientifique à l'époque que nous étudions ici.

Né à Dax en 1733, le chevalier Jean-Charles de Borda appartenait à une famille noble, qui avait déjà fourni à sa ville natale des magistrats municipaux distingués et plus d'un brillant officier à l'armée de son pays ; il était le dixième d'une famille

de seize enfants. Élevé d'abord au collège des Barnabites à Dax, il achève ses études à la Flèche, au collège des jésuites où Descartes avait jadis étudié. En 1755, à vingt-deux ans, nous le trouvons officier dans les chevau-légers, et en même temps maître de mathématiques de ce corps ; il s'était déjà fait connaître par quelques travaux de géométrie qu'il avait envoyés à d'Alembert. En 1756, il adresse à l'Académie son premier *Mémoire sur le jet des bombes* qui inaugure ses travaux sur la résistance de l'air. L'année suivante, nous le trouvons attaché comme aide de camp au maréchal de Maillebois, et il prend part à plusieurs combats. Cependant, ses recherches sur la résistance de l'air avaient dû lui révéler à lui-même ses aptitudes de technicien, et il manifeste l'intention d'entrer dans le corps des ingénieurs militaires. Déjà membre adjoint de l'Académie des sciences, il est admis sans examen, en 1758, à l'école de Mézières. Pendant les années qui suivent, Borda continue ses travaux sur la résistance de l'air, sur le mouvement et l'écoulement de l'eau, sur la résistance que l'eau oppose au mouvement. Par des moyens très simples, il arrive, pour la première fois, à des résultats exacts, rectifiant une foule de propositions grossièrement erronées qui étaient admises comme conséquence d'aperçus que l'on avait pris pour des démonstrations ; Newton était en partie responsable de ces inexactitudes. Borda pousse toujours la théorie jusqu'au point où elle rejoint les applications : les roues hydrauliques (devenues les « turbines » modernes), les pompes, la résistance que l'eau oppose au mouvement d'un navire sont étudiées à fond.

Ces travaux avaient rendu Borda célèbre parmi les techniciens de son temps. A partir de 1767 (il avait alors trente-quatre ans), il va pouvoir appliquer à la marine ses remarquables qualités. Déjà, en 1761, Choiseul avait succédé comme ministre de la Marine à l'incapable Berryer ; après la paix de Paris (1763), le pays tout entier désirait le relèvement de notre flotte, qui était tombée dans le plus complet abandon ; on rechercha des hommes de savoir et de bonne volonté pour aider à ce relèvement. En novembre 1767, Borda est nommé lieutenant de vaisseau, et envoyé à Brest comme lieutenant de port surnuméraire. A partir de ce moment, sous les divers ministres qui se succédèrent à la Marine, il joue fréquemment un rôle de conseiller technique fort important. En 1769, on réorganise l'*Académie de marine*, qui avait été fondée en 1752, mais que les désastres de la guerre de Sept ans avaient rendu inexistante. Borda fut l'un des vingt membres de l'Académie réorganisée, qui comprenait des savants et des marins. Il prend part à de nombreuses expéditions scientifiques destinées à l'essai de méthodes nouvelles et à la rectification des cartes de régions mal connues.

Le 13 avril 1778, la flotte commandée par d'Estaing, comprenant douze vais-

seaux de ligne et quatre frégates, quitte Toulon pour aller secourir « les insurgés » américains ; Borda y exerce les fonctions très importantes de *major général*, chargé de toute l'administration et de tout ce qui concerne la partie technique de la navigation ; sous un chef estimable mais médiocre technicien, il remplit admirablement ses fonctions. Revenu en France en 1780, il est nommé capitaine de vaisseau ; il expose avec force ses idées sur le manque d'homogénéité des escadres et sur les principes qui doivent présider aux constructions navales. En 1782, il est appelé au commandement d'une division navale, chargée de transporter un corps de troupes à la Martinique et d'inquiéter le commerce anglais aux Antilles. Le transport de troupes s'effectue sans accident, mais peu de jours après, par un temps de brume, la petite division française tombe au milieu d'une escadre anglaise beaucoup plus forte. Le *Solitaire* que commandait Borda engage bravement la lutte pour permettre au reste de la division de s'échapper ; après un combat acharné, il succombe, et Borda est fait prisonnier. Les Anglais, qui connaissaient sa réputation, le traitèrent avec distinction. Il rentra dans son pays en 1783 et se remit au travail, profitant de son expérience pour réformer les constructions navales. L'année suivante, il est nommé inspecteur de ces constructions et de l'École des ingénieurs de vaisseaux (génie maritime) ; c'était confirmer la haute autorité qu'il possédait de fait dans les choses de la marine. Il ne cesse cependant pas de s'occuper de science pure ; il perfectionne encore et fait réaliser par Lenoir son « cercle répétiteur ». En 1787, on décide de relier les triangulations géodésiques de France à celles d'Angleterre, par-dessus le Pas de Calais ; les Anglais emploient pour mesurer les angles un imposant appareil construit par Ramsden ; les Français obtiennent d'aussi bons résultats avec un instrument d'aspect beaucoup plus modeste, le cercle de Borda.

La tourmente révolutionnaire devait interrompre la carrière administrative de Borda, mais son activité scientifique allait trouver un magnifique couronnement dans l'établissement du système métrique. Comme tous les techniciens français, il était converti d'avance au système décimal, et plus que personne il était préparé à diriger les travaux qui devaient en assurer les bases. Il joua, dans tout ce travail, un rôle prépondérant. C'est lui qui, avec Cassini, mesure à l'Observatoire la longueur du pendule à secondes ; c'est lui qui fait le plan de la mesure du méridien terrestre, qui fait construire les cercles divisés, qui perfectionne les méthodes pour la mesure des bases et étudie la dilatation des règles devant servir d'unité ; c'est lui enfin qui est chargé de réaliser la règle définitive et qui, aidé de son fidèle collaborateur Lenoir, perfectionne les appareils destinés à comparer entre elles les diverses règles métriques.

Il était fortement attaché à la division décimale des angles ; un des grands soucis des dernières années de sa vie fut de doter le monde de tables trigonométriques construites dans ce système de division ; il les fit calculer chez lui, à ses frais, et pour en assurer la publication vendit une de ses terres. En 1799, Borda mourut, au moment où les nouveaux étalons du système métrique allaient être sanctionnés par la loi.

L ES INSTRUMENTS POUR L'ÉTUDE
DES PROPRIÉTÉS DES CORPS

Lentement, pendant tout le cours du dix-huitième siècle, les données numériques qui caractérisent les propriétés des divers corps se précisent, en même temps que se perfectionnent les appareils qui servent à les étudier. Au début, l'état d'imperfection où se trouve la chimie est une grande gêne pour les observateurs ; la notion même de *composé défini* ayant des propriétés déterminées et toujours les mêmes est absente ; à chaque instant, l'identité des propriétés d'un même corps est remise en question. Au milieu du dix-huitième siècle, on voit des physiciens se demander si l'eau de certaines rivières n'est pas beaucoup plus légère que l'eau commune, si le coefficient de dilatation de l'alcool pur enfermé dans le réservoir scellé d'un thermomètre ne diminue pas avec le temps, si l'ébullition du mercure est produite par de l'air qui s'en dégage ; ces questions restent souvent sans réponse, mais heureusement cela n'empêche pas d'aller de l'avant, et le seul fait, par exemple, de donner une table correcte des densités des divers corps contribue, plus que toutes les discussions, à introduire dans la science la notion de composé défini.

Parmi les instruments qui servent aux mesures des physiciens, il en est qui viennent, en quelque sorte, de l'extérieur. C'est le cas pour les balances qui, pour les besoins du commerce des métaux précieux, étaient déjà construites avec une grande perfection ; celles dont on se servait à la fin de la période que nous étudions ici étaient sans doute moins commodes que les balances ordinaires de nos laboratoires, mais n'étaient pas beaucoup moins précises. Les besoins de la géodésie avaient posé le problème des mesures de longueur, et les perfectionnements apportés aux règles divisées rejaillirent sur beaucoup d'instruments de physique, en particulier sur les baromètres qui, après que l'on eut pris l'habitude de faire bouillir le mercure pour chasser l'air et l'humidité, avaient à peu près la disposition des appareils actuels. Leur usage était fort commun ; dans la seule ville de Nérac, où de Romas avait répandu le goût de la physique, on en comptait plus de cinquante en 1748.

Le thermomètre, mesurant les températures au moyen des dilatations, remontait au milieu du dix-septième siècle, mais ne trouva qu'au dix-huitième ses moyens de graduation définitifs ; ce fut une œuvre assez longue, où presque tous les phy-

siciens apportèrent quelque chose. Amontons, tout au début du dix-huitième siècle, paraît avoir eu le premier l'idée d'employer deux points fixes, ajoutant au point de fusion de la glace, dont la fixité était connue depuis longtemps, le point d'ébullition de l'eau, dont il reconnut la constance. De plus, trop en avance sur son temps, il construisit le *thermomètre à air*, identique quant à son principe à l'appareil actuel. Les appareils d'Amontons ne se répandirent pas ; on continua à employer des thermomètres non comparables entre eux. C'est à Réaumur qu'est due la première unification des degrés thermométriques, dans un travail publié en 1730, où les méthodes qu'il employait sont minutieusement décrites. Il renonce (et cela n'était pas un progrès) aux deux points fixes d'Amontons, pour ne conserver que le point de fusion de la glace, où il place le *zéro* ; la graduation est déterminée par cette condition que, pour chaque degré, le liquide (de l'esprit-de-vin) se dilate de la millième partie de son volume initial. Le thermomètre de Réaumur devint rapidement d'un usage presque universel ; chose curieuse, tandis qu'il a depuis longtemps disparu en France, il s'est maintenu dans les pays de langue allemande par un choix du point d'ébullition de l'eau (80°) qui conserve l'échelle de Réaumur.

Les propriétés des gaz sont celles qui restent le moins bien connues. Jusqu'à Lavoisier, il ne peut être question de l'étude individuelle des divers gaz, que l'on ne sait pas distinguer nettement les uns des autres ; seul, l'air atmosphérique est un sujet d'études pour les physiciens, et encore les mesures sont-elles souvent faussées par les quantités variables de vapeur d'eau que dégagent les parois des vases employés. Cependant, la densité de l'air est à peu près connue par des expériences analogues à celle du Puy de Dôme ; rien de nouveau n'est ajouté sur les propriétés élastiques de l'air et sa dilatation n'est encore que bien mal déterminée. Ce ne sont pas les appareils de mesure qui font défaut, mais bien, comme il arrive souvent en physique, les méthodes propres à éliminer du phénomène simple que l'on veut étudier les complications parasites.

III

L'OPTIQUE AU DIX-HUITIÈME SIÈCLE

L'OPTIQUE DE
NEWTON

En ce qui concerne l'optique, tout le dix-huitième siècle est resté comme figé dans l'admiration de l'œuvre de Newton. Œuvre vraiment admirable, mais qu'il fallait prendre comme la base et non le couron-

nement d'une science. De loin en loin, une voix isolée s'élève pour faire connaître un point de vue nouveau, mais ne trouve aucun écho. C'est ce qui arrive à ceux qui essaient de faire revivre la théorie des ondes, et d'y introduire la notion de radiation simple, la grande découverte de Newton. Malebranche, cartésien irréductible, dans ses *Réflexions sur les lumières et les couleurs et la génération du feu* (1699) émet l'idée que la lumière est produite par des vibrations périodiques, et que chaque valeur de la période caractérise une radiation simple ; soixante ans plus tard, Euler, dans ses célèbres *Lettres à une princesse d'Allemagne*, se prononce aussi pour la théorie des ondes et reprend, peut-être sans la connaître, l'idée de Malebranche. Sans base expérimentale, fondées seulement sur des affirmations *a priori*, ces idées nouvelles ne sont pas prises en considération ; elles étaient à peu près oubliées lorsque au commencement du dix-neuvième siècle, Young et Fresnel reprirent l'œuvre de Huygens.

Les seules découvertes importantes à signaler pendant la période que nous étudions sont, d'une part, la fondation de la photométrie par Pierre Bouguer, et d'autre part quelques progrès dans la construction et la théorie des instruments d'optique.

PERFECTIONNEMENT
DES INSTRUMENTS Le public français du dix-huitième siècle ne cessa de s'intéresser aux progrès des instruments d'optique ; et cependant, il faut le reconnaître, c'est en Angleterre que furent réalisés les plus importants progrès techniques.

La construction des lunettes en était restée au point où l'avait amenée Huygens vers le milieu du dix-septième siècle ; l'Italien Campani n'avait pas été dépassé dans l'art de construire les objectifs de long foyer. Quant au principe du télescope à réflexion, inventé et réinventé plusieurs fois au cours du même siècle, il n'avait encore fourni que des appareils de petite dimension ; un moment à la mode au dix-huitième siècle, il ne devint un instrument de recherche qu'avec le grand Herschel. Il faut dépasser le milieu du dix-huitième siècle pour trouver quelque chose de nouveau dans l'histoire des lunettes, avec l'invention de l'objectif achromatique.

Le perfectionnement des objectifs avait occupé les plus grands esprits du siècle précédent. Descartes s'y était complètement trompé en attribuant leurs imperfections à la forme sphérique des faces ; ce fut Newton, après sa découverte de la décomposition de la lumière blanche, qui en trouva la véritable cause, mais en même temps il affirma, sur la foi d'une seule expérience et d'une généralisation

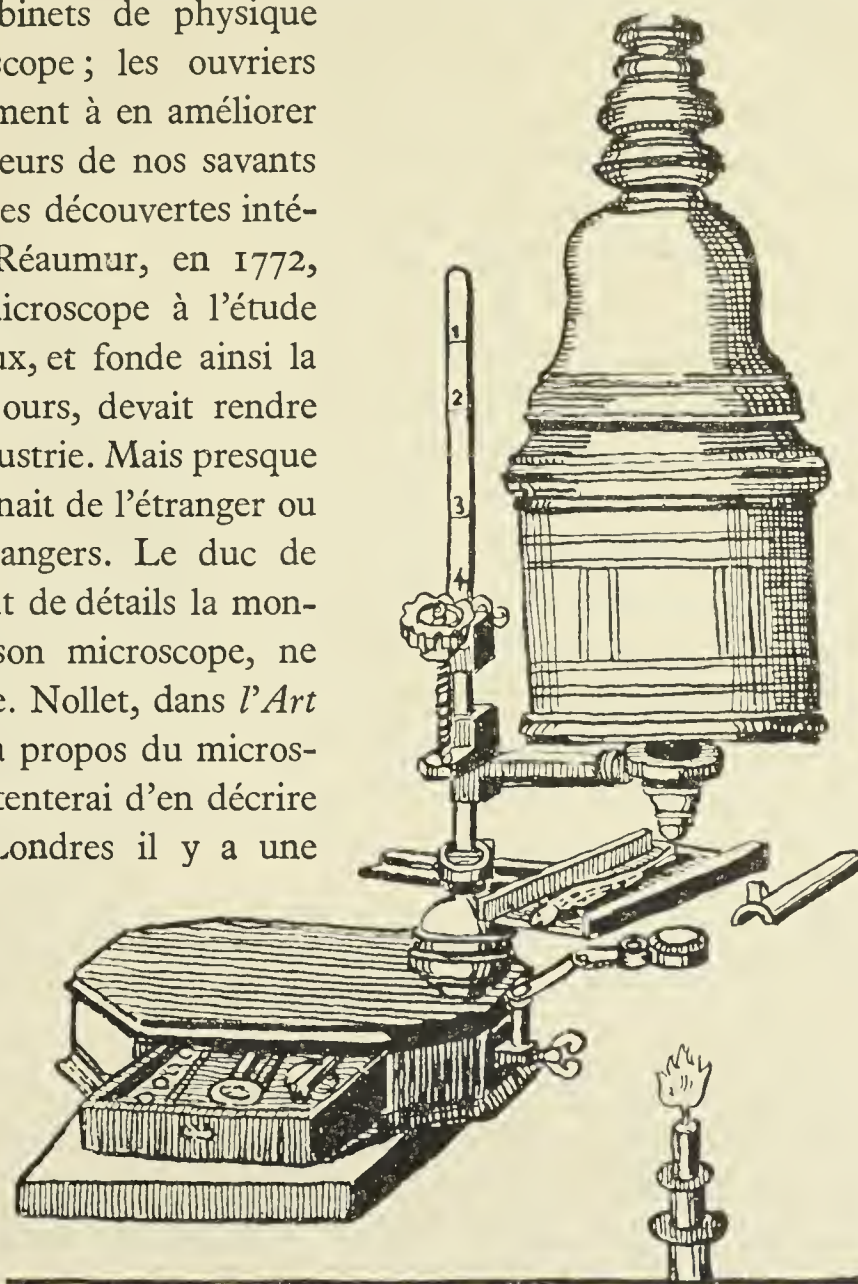
trop hâtive, que le mal était incurable, et qu'aucune combinaison de milieux transparents ne pourrait faire converger la lumière sans la décomposer. On vécut pendant plus d'un demi-siècle sur cette affirmation. Euler, le grand géomètre de Bâle, éleva en 1747 les premiers doutes sur l'affirmation de Newton, dans un mémoire *Sur la perfection des verres objectifs des lunettes*. Chose curieuse, Euler est conduit à contester l'affirmation de Newton en considération de ce que l'œil humain se comporte comme un instrument achromatique ; or, nous savons que cela est inexact, et que l'œil a exactement le même défaut d'achromatisme que les lentilles simples alors seules connues. Cependant, l'attention était attirée sur ce problème, qui fut dès lors l'objet de nombreux essais. En 1757, l'opticien Dollond, d'une famille protestante française réfugiée en Angleterre, parvint à le résoudre en construisant un objectif composé d'une lentille convergente en verre ordinaire et d'une divergente en cristal. Dollond ne fit pas connaître le détail de sa construction, et les objectifs achromatiques restèrent longtemps une spécialité de sa famille, à laquelle appartint le célèbre constructeur Ramsden qui, à la fin du dix-huitième siècle, s'acquit une réputation européenne. De longtemps, on n'eut pas en France les verres nécessaires à la fabrication de ces lentilles ; mais notre pays contribua à leur perfectionnement par des travaux théoriques importants. Dès 1756, avant même le succès définitif de Dollond, Clairaut avait publié un important mémoire où le problème de l'objectif double et le calcul de ses courbures sont abordés dans toute leur généralité. D'Alembert s'occupe aussi de la même question. Ainsi sont fondés, chez nous, les principes de l'optique géométrique. Euler, à son tour, étudie le même sujet un peu plus tard.

Pour associer convenablement les deux verres, il fallait en étudier d'abord les propriétés optiques ; ce fut Rochon qui, en 1777, donna pour cela un moyen simple par l'invention de son *diasporamètre*, qui permettait de comparer les pouvoirs dispersifs des verres.

C'est aussi en Angleterre et en Hollande que le microscope à ses débuts fut surtout perfectionné. Les études de micrographie, inaugurées au dix-septième siècle par l'Anglais Hooke (dont le livre est de 1665), furent à la mode pendant tout le dix-huitième siècle, et firent peu à peu découvrir tout le monde nouveau des êtres microscopiques et les éléments microscopiques des êtres vivants ; ces découvertes appartiennent à l'histoire de la biologie. Comme microscope, on employa encore souvent le microscope simple, petite lentille de très court foyer, parfois même simple globule de verre fondu à la lampe, gros comme une tête d'épingle. Ce n'est qu'à la fin du dix-septième siècle que le « microscope composé »,

dont le principe était connu depuis longtemps, fut construit d'une manière assez parfaite pour devenir réellement utilisable.

Les savants et les curieux, en France, s'intéressèrent vivement aux observations microscopiques ; tous les cabinets de physique contenaient quelque microscope ; les ouvriers français s'employèrent utilement à en améliorer la partie mécanique et plusieurs de nos savants firent, avec cet instrument, des découvertes intéressantes. C'est ainsi que Réaumur, en 1772, inaugure l'application du microscope à l'étude de la constitution des métaux, et fonde ainsi la *métallographie* qui, de nos jours, devait rendre de si grands services à l'industrie. Mais presque toujours, la partie optique venait de l'étranger ou était copiée de modèles étrangers. Le duc de Chaulnes, qui décrit avec tant de détails la monture fort bien étudiée de son microscope, ne dit rien de la partie optique. Nollet, dans *l'Art des expériences* (1770), écrit à propos du microscope composé : « Je me contenterai d'en décrire un que j'ai fait venir de Londres il y a une vingtaine d'années, et que nos lunetiers ont imité depuis. » Montucla, dans son *Histoire des mathématiques*, écrit : « Les microscopes faits par Dellebarre à la Haye en 1771 ont eu la plus grande réputation. Je les vis dans mon voyage de Hollande en 1773 et j'engageai l'auteur à venir en France, où il fut très accueilli, et où il en vendit beaucoup ; ils coûtaient trois cent soixante livres. »



MICROSCOPE DOUBLE DE MARSHAL
(D'après le *Cours d'optique de Smith*, traduit par le père Pézenas, 1767).

Les ouvrages même qui traitaient des instruments d'optique avaient en France un grand succès, mais ils étaient traduits de l'anglais. *Le Microscope à la portée de*

tout le monde, publié en 1754, était la traduction de l'ouvrage anglais de Baker. L'ouvrage de Smith, *A compleat system of opticks*, fut traduit deux fois la même année 1767, par le père Pézenas, professeur royal d'hydrographie, puis directeur de l'Observatoire de Marseille, et par Duval-Leroi, professeur d'hydrographie à Brest.

Cette situation avait éveillé l'attention et, comme du temps de Colbert, des tentatives intéressantes furent faites sous Louis XVI pour la modifier. En 1774, l'abbé Rochon avait été nommé garde-chef du cabinet de physique et d'optique du roi, installé au château de la Muette. C'était un physicien, modeste et ingénieux, qui consacra presque toute sa vie à l'étude et au perfectionnement des instruments. Il avait déjà pris part à plusieurs voyages scientifiques lointains et étudié des instruments destinés aux observations nautiques. Il fut, un peu plus tard, nommé directeur d'un « institut d'optique », dépendance du cabinet d'optique du roi. La Révolution interrompit ce mouvement, qui aurait sans doute mis notre pays au niveau des pays voisins. Rochon eut cependant le temps de produire des améliorations intéressantes, qui ne furent pas sans conséquences. On connaissait, depuis Huygens, les propriétés biréfringentes du quartz ; Rochon s'en servit pour construire un prisme biréfringent, qu'il utilisa pour la mesure des petits angles. Les fondateurs de l'optique moderne, au commencement du dix-neuvième siècle, connaissaient bien cet appareil dont ils se servaient journellement pour leurs recherches sur la lumière polarisée.

L A PHOTOMÉTRIE. BOUGUER

Une place tout à fait à part doit être faite aux travaux de Bouguer sur la photométrie.

Né en 1698 au Croisic, Pierre Bouguer appartenait lui aussi à la marine par sa famille et par les fonctions qu'il occupa d'abord. Son père était professeur d'hydrographie, et il lui succéda de très bonne heure ; la plupart de ses ouvrages, qui longtemps firent autorité, se rapportent à la navigation et à l'art d'observer en mer, et il joua un rôle important dans les grandes expéditions scientifiques du milieu du dix-huitième siècle. On lui doit aussi de nombreuses observations astronomiques, pour lesquelles il avait inventé, sous le nom d'*héliomètre*, un appareil très remarquable pour la mesure des petits angles. La partie la plus originale de son œuvre est la fondation de la science de la photométrie. Elle est exposée dans son *Essai d'optique sur la graduation de la lumière*, publié en 1729 ; pendant les deux dernières années de sa vie, Bouguer avait repris ses études de photométrie dont d'autres occupations l'avaient éloigné ; lorsqu'il mourut, en 1758, il avait achevé la rédaction

d'un ouvrage plus étendu, que son ami La Caille publia en 1760 sous le titre : *Traité d'optique sur la graduation de la lumière*. Le début de l'*Essai* de 1729 mérite d'être cité, car il est caractéristique de l'état d'esprit des savants du dix-huitième siècle, qui pensaient que, depuis Newton, l'optique était une science finie, à laquelle Bouguer s'excuse presque de vouloir ajouter quelque chose : « Il peut sembler qu'après toutes ces vastes spéculations, il ne doit plus rien rester à décou-

vrir dans cette matière ; cependant, il est facile de s'apercevoir que, comme on s'est presque toujours borné jusqu'ici à examiner la seule situation ou direction des rayons, il doit manquer encore à l'optique une partie tout entière, qui aurait la force ou la vivacité de la lumière pour objet. » Ce programme, Bouguer l'exécute par des moyens d'une admirable simplicité. Il établit la loi qui donne l'éclairement produit par une source de lumière en fonction de la distance, et base toutes ses mesures sur cette loi ; il s'en sert pour comparer entre elles les intensités des sources de lumière dont il pouvait disposer, puis pour comparer, toujours par des moyens très simples, les éclaircissements produits par le soleil et par la lune. Sans



BOUGUER

(D'après un portrait de Perroneau, gravé par Miger).

prétendre à une précision illusoire, ces mesures, fort difficiles, sont d'une exactitude qui n'a été dépassée que dans ces dernières années, et plusieurs des physiciens qui se sont occupés des mêmes questions au dix-neuvième siècle auraient donné des résultats plus exacts que les leurs s'ils s'en étaient tenus à ceux de Bouguer. Passant à l'étude de l'absorption de la lumière par les milieux imparfaitement transparents, Bouguer trouve la loi, encore connue sous son nom, qui donne l'intensité de la lumière transmise en fonction de l'épaisseur traversée. Comme application, il étudie l'affaiblissement de la lumière des astres dans son passage à travers l'atmosphère et, à ce propos, pose les bases de la théorie de la réfraction

atmosphérique. Toujours guidé par le plus sûr bon sens, Bouguer apporte dans chaque question des aperçus neufs et ingénieux, fait des calculs sans jamais perdre de vue les réalités physiques, et donne un exemple admirable de questions difficiles résolues par des moyens simples. Un ouvrage anglais récent consacré à la mesure de la lumière porte comme frontispice un portrait de Bouguer avec cette dédicace : « A la mémoire de Pierre Bouguer, le père de la photométrie. »

La photométrie n'avait encore qu'un intérêt scientifique. Un siècle plus tard, avec les débuts de l'industrie du gaz, lorsque l'on commença à vendre de la lumière, la mesure des intensités lumineuses prit un intérêt pratique et même commercial ; c'est alors, en suivant la route tracée par Bouguer, que prit naissance la photométrie pratique, en grande partie entre les mains de Dumas et de Regnault, dont les recherches effectuées en 1862 ont, jusqu'à la fin du dix-neuvième siècle, servi de base à toute la science de l'éclairage.

IV

LES DÉBUTS DE LA SCIENCE DE L'ÉLECTRICITÉ ET DU MAGNÉTISME

PÉRIODE ANCIENNE Il y a une curieuse disproportion entre l'importance actuelle de la science de l'électricité et les débuts modestes de cette science. Tout le monde sait à quelles applications incomparables a conduit l'étude des phénomènes électriques, au point que les conditions matérielles de notre existence en ont été bouleversées ; leur importance n'est pas moins grande dans les théories physiques modernes puisque, renonçant à les expliquer, à les ramener à quelque autre action, nous avons pris le parti de les prendre comme base, comme phénomènes fondamentaux irréductibles, auxquels on cherche à ramener presque tous les autres. Les débuts de cette science ambitieuse ne faisaient rien prévoir de pareil, et, pendant sa longue enfance, les phénomènes qu'elle étudie sont restés un simple objet de curiosité, un peu dédaigné par les grands fondateurs de la philosophie naturelle.

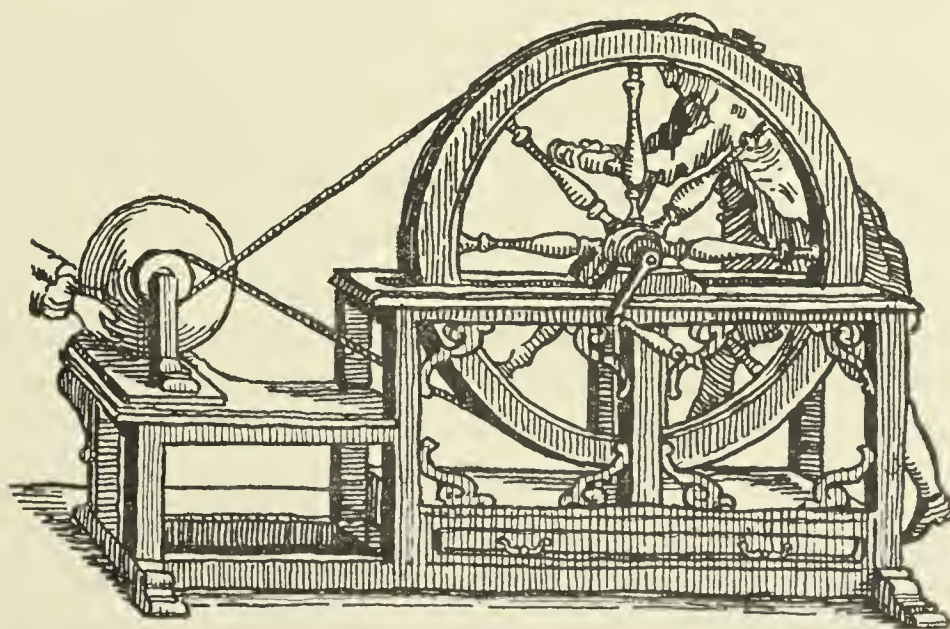
Ce n'est qu'au dix-septième siècle que nous trouvons des ouvrages d'ensemble sur les phénomènes électriques et magnétiques. Le premier en date est de 1600 ; il est dû à l'Anglais William Gilbert, médecin de la reine Elisabeth, et contient un exposé complet de ce qui était alors connu sur les aimants et sur les corps qui, par frottement, acquièrent la propriété d'attirer les corps légers.

Beaucoup plus tard, en 1672, Otto de Guericke, bourgmestre de Magdebourg, publie à Amsterdam ses expériences d'électricité, commencées une dizaine d'années auparavant. Il se sert, embryon de la « machine électrique », d'un globe de soufre que l'on fait tourner et que l'on frotte avec la main ; il obtient de petites étincelles et découvre la *répulsion* que subit un corps léger après avoir été attiré jusqu'au contact.

LES BAROMÈTRES LUMINEUX

fut l'objet, surtout en France, de nombreuses publications. Un soir, en transportant un baromètre de l'Observatoire à la place Saint-Michel, Picard remarqua que la chambre barométrique, dont le mercure était secoué pendant le transport, était rendue lumineuse. On essaya aussitôt de répéter l'expérience sur d'autres baromètres : en agitant le tube, quelques-uns devenaient

Presque à la même époque, en 1675, l'abbé Picard observa par hasard un phénomène qui attira vivement l'attention et fut l'objet, surtout en France, de nombreuses publications. Un soir, en transportant un baromètre de l'Observatoire à la place Saint-Michel, Picard remarqua que la chambre barométrique, dont le mercure était secoué pendant le transport, était rendue lumineuse. On essaya aussitôt de répéter l'expérience sur d'autres baromètres : en agitant le tube, quelques-uns devenaient



MACHINE ÉLECTRIQUE DE L'ABBÉ NOLLET (1746).

lumineux, tandis que d'autres restaient obscurs. En raison même de son caractère capricieux, les savants de l'Académie furent vivement intrigués par ce phénomène, auquel on donna le nom de « phosphore des baromètres », ou « phosphore mercuriel ». Pendant près de cinquante ans, on ne sut même pas construire à volonté un baromètre phosphorescent. Lorsqu'en 1723 du Fay donna le moyen (on pourrait presque dire la « recette ») pour réaliser à coup sûr ce résultat, cela fut considéré comme une grande découverte, bien qu'il ne s'agît que de propreté du tube et de séchage du mercure. Quant à la cause du phénomène, Hawksbee, qui était chargé de préparer les expériences de la Société royale de Londres, avait indiqué que c'était un phénomène de décharge électrique dans un gaz raréfié, dû au frottement du mercure sur le verre. L'explication était exacte, et l'expérience

de Picard était un des premiers anneaux de la longue chaîne qui devait aboutir, par l'étude de l'électricité dans les gaz, aux idées modernes sur la constitution de la matière ; mais ce n'est que dans la deuxième moitié du dix-huitième siècle, après que l'on se fut familiarisé avec les curieuses apparences de la décharge électrique dans les gaz raréfiés, que l'explication donnée par Hawksbee fut universellement admise.

RECHERCHES DE DU FAY Jusque-là, les phénomènes électriques n'avaient soulevé qu'un intérêt très limité ; c'est à partir de 1730 que la curiosité commence à s'éveiller sur eux, particulièrement en France et en Angleterre, et les découvertes se succèdent rapidement.

Les propriétés électriques n'avaient été communiquées qu'à certains corps, comme l'ambre et le soufre, les autres étant considérés comme *non électriques*. En 1729, l'Anglais Stephan Gray montre qu'en réalité les corps se divisent en *conducteurs* et *non conducteurs*, et que les conducteurs peuvent, eux aussi, être électrisés, à la condition d'être *isolés*. En 1732, il électrise le corps humain, réalisant les premières de ces expériences qui devaient en France tant intéresser et amuser même les gens de la cour du temps de Louis XV et de Louis XVI. Il découvre aussi que l'on peut électriser un conducteur sans le mettre en contact avec un corps électrisé, par simple influence à distance.

Presque à la même époque, commencent les travaux de ce que l'on peut appeler sans exagération l'*école française* en électricité.

Charles-François de Cisternay du Fay, né en 1698, était le fils d'un officier qui s'était fait une réputation comme bibliophile ; il avait, lui aussi, embrassé la carrière militaire, mais l'abandonna de très bonne heure pour se consacrer entièrement à la science. Son premier travail, en 1723, fut une étude systématique des moyens propres à la construction de baromètres phosphorescents. Il s'occupa aussi de chimie, de botanique et fut surintendant du Jardin des Plantes, charge où il se montra administrateur bienveillant et avisé. Buffon fut son successeur. On venait de confier à du Fay une étude sur les poids et mesures des différentes provinces du royaume, lorsqu'il mourut de la petite vérole à quarante et un ans, en 1739. Ses travaux sur l'électricité ont été publiés dans les *Mémoires de l'Académie des Sciences* de 1733 à 1737. Ils contiennent la découverte fondamentale des deux espèces d'électricité, que l'on désigna sous le nom d'électricité vitreuse et d'électricité résinée. On trouve bien d'autres faits dans ses travaux ; l'importance de quelques-uns ne fut vraiment comprise que beaucoup plus tard, en particulier

la conductibilité des flammes, qui donnait le premier exemple d'un gaz conducteur, désigné de nos jours sous le nom de *gaz ionisé*. Il construisit aussi, sous une forme encore un peu primitive, le premier électroscope composé de deux fils suspendus qui se repoussent lorsqu'ils sont électrisés ; l'électroscope à feuille d'or, qui rend encore aujourd'hui de si grands services dans les recherches sur la radio-activité, en dérive directement.



J.-A. NOLLET

(D'après un portrait de La Tour, gravé par Beauvarlet).

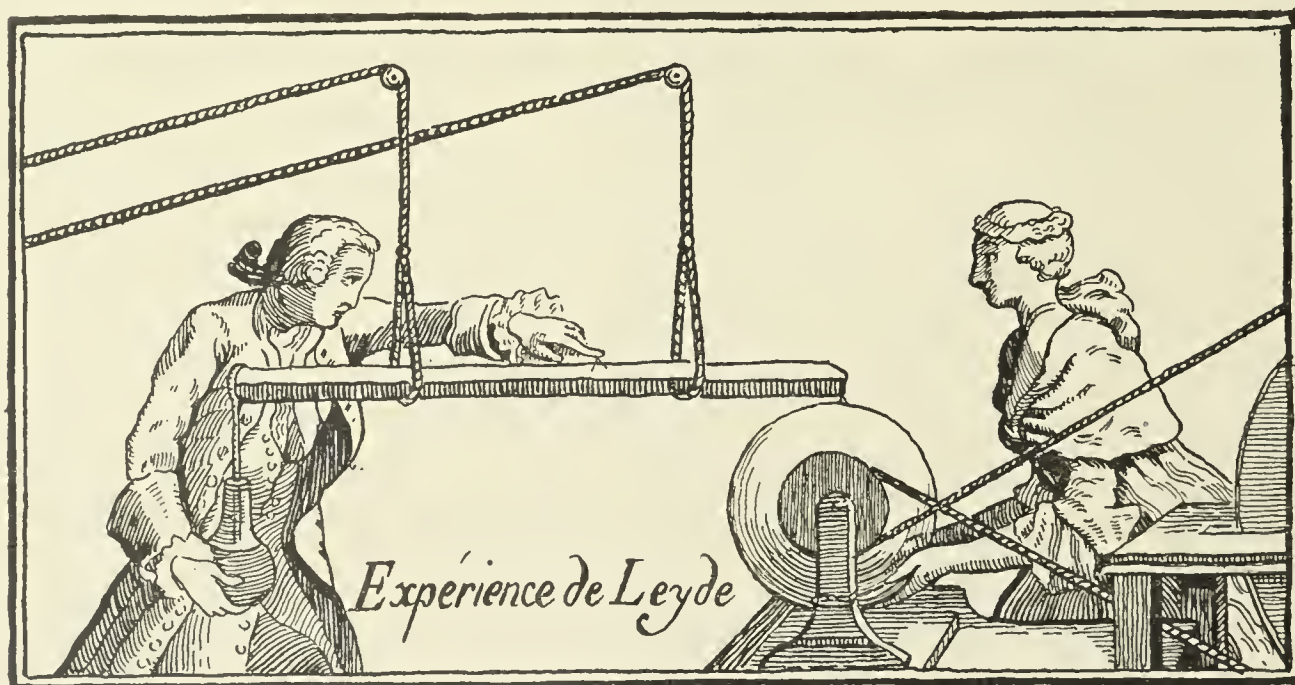
LA MODE DES EXPÉRIENCES D'ÉLECTRICITÉ. NOLLET

C'est justement à cette époque que le public instruit, en France, commença à s'intéresser à ce que l'on appelait déjà la physique expérimentale, et en particulier aux expériences d'électricité. L'abbé Nollet avait assisté aux expériences de du Fay, en même temps qu'à celles de Réaumur sur d'autres parties de la physique ; toute sa vie il s'employa, avec une activité inlassable, à vulgariser la physique expérimentale, et surtout l'électricité. Sans apporter lui-même de contribution importante à la science, tout en défendant parfois des idées théoriques médiocres, il rendit un im-

mense service en retenant l'attention du public instruit sur une science où presque tout était encore à découvrir.

De 1730 à 1760 environ, se produisent, en électricité, une série de petites découvertes dont chacune n'est pas un événement considérable, mais qui, réunies, forment peu à peu le corps de la nouvelle science. Nollet, au courant de tout, répète toutes ces expériences et les fait connaître au public. Ce ne sont pas seulement les ouvrages scientifiques qui signalent ces découvertes : la *Gazette de France* en fait mention à plusieurs reprises. Nollet parle avec une admiration un peu enfantine de choses

qui nous semblent bien naturelles, mais qui, en effet, devaient paraître extraordinaires à ceux qui les voyaient pour la première fois. « Je n'oublierai jamais, écrit-il dans ses *Leçons de physique*, la surprise que nous causa, à M. du Fay et à moi, la première étincelle que nous vîmes éclater sur la jambe de l'un des nôtres, que nous avions électrisé; on se souviendra longtemps d'avoir vu la cour et la ville se rendre avec le plus grand empressement pour voir l'expérience de Leyde; on se souviendra d'avoir vu jusqu'au peuple s'en divertir à prix d'argent dans les lieux publics. »

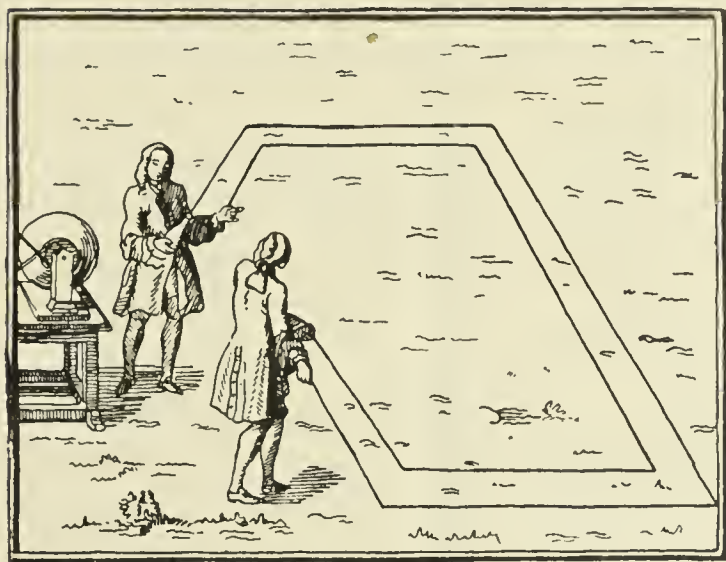


L'EXPÉRIENCE DE LEYDE

(D'après une planche de l'*Essai sur l'électricité des corps*, de l'abbé Nollet, 1746).

L'EXPÉRIENCE DE LEYDE Cette « expérience de Leyde » fut, en effet, l'une de celles qui étonnèrent le plus le monde scientifique et même le grand public français. Réalisée presque en même temps, en 1745, en Allemagne et en Hollande, elle fut connue en France au début de 1746 par deux lettres, adressées à Réaumur et à Nollet par deux professeurs de l'Université de Leyde, Musschenbroek et Allamand; après avoir décrit la secousse qu'il a ressentie et qui lui a paru formidable, Musschenbroek déclara que « rien au monde ne serait capable de lui faire essayer la chose de nouveau ». L'abbé Nollet répéta systématiquement l'expérience, en varia et précisa les conditions, et fit ressentir la commotion électrique à tous les curieux qui suivaient ses cours. C'est lui qui donna à l'appareil le nom

de « bouteille de Leyde ». Il fit l'expérience, à Versailles, en présence du roi, sur une chaîne de deux cent quarante personnes se tenant par la main qui, toutes ensemble, éprouvent la même commotion. « Le coup que chacun reçoit, dit l'*Histoire de l'Académie*, part en même temps, il est singulier de voir la multitude des différents gestes, et d'entendre l'exclamation instantanée que la surprise arrache de la plus grande partie de ceux qui éprouvent la commotion. » La même année (1746), Guillaume Le Monnier, médecin du roi et professeur de botanique au Jardin du



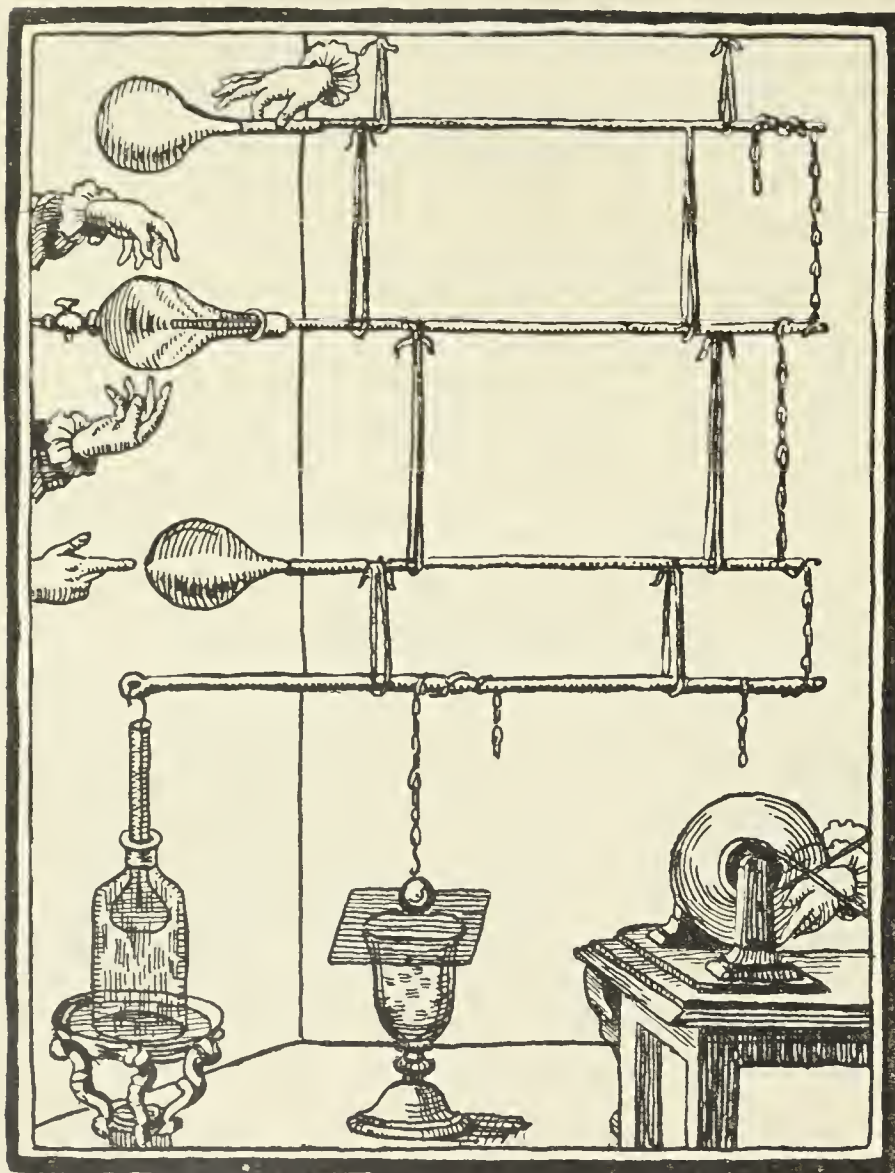
EXPÉRIENCE DE LE MONNIER SUR LA VITESSE DE L'ÉLECTRICITÉ. (D'après les *Mémoires de l'Académie des sciences*, 1751).

roi, fait le premier essai pour mesurer la vitesse de propagation de l'électricité. Le circuit de décharge de la bouteille de Leyde contient deux observateurs, l'un qui manœuvre la bouteille, l'autre qui est intercalé dans le circuit contenant un fil métallique de quatre kilomètres de longueur, qui fait tout le tour de l'enclos du couvent des chartreux. Au moment où se produit la décharge, le second observateur perçoit la secousse à l'instant même où il voit l'étincelle ; la durée de propagation à travers le long circuit métallique

n'atteint pas même une petite fraction de seconde. Il suffit à Fizeau, un siècle plus tard, d'employer une méthode plus sensible dans la mesure du petit intervalle de temps pour que le problème soit complètement résolu.

COLLECTION DES PETITES DÉCOUVERTES. Chaque nouveau moyen d'action était l'occasion de la découverte de quelque petit fait nouveau ; chaque nouvelle expérience était aussitôt connue en France, répétée, variée, amplifiée le plus possible. En 1744, le médecin allemand Ludolf avait réussi à enflammer de l'éther par l'étincelle ; ce fut l'origine d'une infinité d'expériences amusantes, qui, si elles n'apprenaient rien de nouveau, donnaient l'occasion de perfectionner les appareils. La machine électrique reçoit peu à peu ses organes essentiels : globe ou plateau frotté, soit avec la main, soit avec un coussin ; conducteur isolé, suspendu par des fils de soie. Chaque amateur tient à honneur d'avoir

une machine plus puissante que les autres ; le duc de Chaulnes en fait construire une dont le plateau a cinq pieds de diamètre et qui donne des étincelles de vingt-deux pouces. Les bouteilles de Leyde sont associées en *batteries*, avec lesquelles



DÉCHARGES ÉLECTRIQUES DANS L'AIR RARÉFIÉ (1753).

on peut foudroyer de petits animaux ; la chaleur dégagée au moment de la décharge devient évidente, et cela devient une sorte de sport que de fondre ainsi des fils métalliques de plus en plus gros. Le passage de l'électricité à travers les gaz raréfiés, dont l'étude devait révolutionner la physique moderne, n'est encore que l'occasion de jolies expériences, contribuant à la fois au perfectionnement de la machine pneumatique et de la machine électrique.

A la même époque, la science américaine débute brillamment avec les recherches de Franklin sur l'électricité. On sait quel rôle important joua ce grand homme dans le développement

de la colonie anglaise de Pennsylvanie, puis dans les événements qui devaient amener l'indépendance américaine. Administrateur de haute valeur (il fut, dès 1737, directeur du service des postes en Pennsylvanie, et c'est sur son initiative que fut établi, en 1775, un service général des postes dans les colonies anglaises de l'Amérique du Nord), plus tard habile diplomate (c'est en grande partie par son influence personnelle que fut obtenue, en 1778, l'alliance entre la France

et les colonies américaines révoltées), il trouva le temps, avec ses amis de Philadelphie, de s'occuper d'électricité et d'y faire d'importantes découvertes. Il fut, de bonne heure, en correspondance avec les savants français, parfois en discussion avec eux, et tous ses écrits eurent en France un grand retentissement ; plus tard, en 1776, lorsqu'il vint habiter Passy comme délégué de ses compatriotes révoltés, il sut habilement profiter de sa notoriété scientifique pour rendre l'opinion publique française favorable à son pays.

En 1746, Collinson, membre de la Société royale de Londres, avait envoyé à ses amis de Philadelphie un « tube électrique », simple tube de verre qui s'électrisait par frottement. Ce modeste appareil fut remis à Franklin, qui s'occupa de répéter les expériences connues en Europe ; ce fut l'origine de ses recherches. En 1747, il découvre les propriétés des conducteurs terminés par une pointe. Bientôt, son attention se porte sur les phénomènes électriques de l'atmosphère, qui devaient, pendant quelques années, exciter une vive curiosité.

L A FOUDRE Les anciennes théories sur la foudre étaient, en somme, purement verbales ; on y parlait d'exhalaisons du sol, subitement enflammées ; cela n'avait aucun sens. Dès que l'on eut observé distinctement l'étincelle électrique, l'idée devait venir que la foudre était, en grand, ce que l'on produisait sur une petite échelle, que l'étincelle était un minuscule coup de foudre. L'idée fut énoncée, sous des formes assez vagues, de divers côtés ; l'un des premiers, Nollet l'adopta et la propagea, mais il restait à faire la preuve. Ce fut Franklin qui, en 1749, publia un projet d'expérience destiné à apporter cette preuve : il proposait d'élever en l'air une tige de fer isolée, terminée par une pointe, et de constater, par les moyens alors classiques (attractions et répulsions, étincelles, etc.), que la tige s'électrise au passage d'un nuage orageux. Sans attendre la vérification, il propose, dès l'année suivante, son projet de paratonnerre pour la protection des édifices contre la foudre.

Les idées de Franklin trouvaient, particulièrement en France, un terrain tout prêt à les recevoir ; c'est en France qu'elles reçurent la confirmation de l'expérience. Le célèbre naturaliste Buffon, curieux de tous les phénomènes naturels, fut l'un de ceux qui s'enthousiasmèrent pour elles. Sur son conseil, le botaniste Dalibard publia sans tarder la traduction des lettres de Franklin. Buffon installa lui-même une tige isolée dressée en l'air sur la tour de son château de Montbard ; à sa demande, une tige analogue fut installée par Dalibard à Marly, et par Delor, qui possédait à Paris un de ces *cabinets de physique* où l'on montrait aux curieux

pour de l'argent les nouvelles expériences, sur sa maison de la place de l'Estrapade. Le 10 mai 1752, Dalibard, pendant un orage, tire des étincelles de la tige dressée à Marly; Delor obtient le même résultat le 18 mai. Tout le monde voulut



FRANKLIN

(D'après une gravure de Martinet).

répéter l'expérience; le roi lui-même voulut la voir. Lemonnier s'aperçoit qu'il n'est même pas nécessaire d'attendre un orage; par temps serein, la tige montre toujours des signes d'électricité, d'une manière variable, tantôt d'une espèce, tantôt de l'autre. Ce fut l'origine de la science de l'électricité atmosphérique, science difficile et complexe comme toutes celles qui ont pour but l'étude de notre atmosphère, et qui est loin de nous avoir livré tous ses secrets.

La *Gazette de France* avait rendu compte, dès le 27 mai 1752, du succès des expériences de Dalibard et de Delor; Jacques de Romas, assesseur au présidial de Nérac, en eut connaissance au début de juin; déjà au courant des expériences d'électricité, en correspondance avec Nollet, qui était venu faire des cours de physique expérimentale à Bordeaux en 1740, de Romas avait pensé à l'identité

de la foudre avec l'étincelle électrique. Il répète l'expérience de Marly, fait à ce sujet plusieurs observations intéressantes (entre autres, comme Lemonnier, celle de l'électricité par temps serein). Bientôt, l'idée singulièrement ingénieuse lui vient d'employer un cerf-volant pour élever le conducteur à une hauteur beaucoup plus grande que celle d'une tige de fer; l'expérience est faite avec un plein succès le 7 juin 1753. Elle fut répétée presque journal-

lement, avec des effets parfois terrifiants. Quelques mois avant, une expérience analogue, mais dans des conditions plus modestes, avait été faite par Franklin à Philadelphie, mais publiée seulement un peu plus tard. Le dix-neuvième siècle devait reprendre l'emploi du cerf-volant pour l'exploration de la haute atmosphère.

La conséquence de ces expériences qui attira le plus l'attention publique fut l'invention du paratonnerre, dont Franklin avait eu l'idée alors que la nature électrique de la foudre n'était encore qu'une hypothèse, et qui fut bientôt réalisée par lui à Philadelphie. De nombreuses discussions s'élevèrent dans tous les pays sur l'utilité du nouvel engin ; les uns, trop enthousiastes, admettaient un peu vite que « le tonnerre était maintenant au pouvoir des hommes » ; les autres, trop sceptiques, ne pou-



L'EXPÉRIENCE DU CERF-VOLANT PAR DE ROMAS

vaient croire que l'on ait pu dompter la foudre au moyen d'une simple baguette de fer. On a souvent reproché à Nollet de s'être rangé résolument parmi ces derniers, et l'on a voulu y voir une preuve de jalousie envers un illustre émule ; et, cependant, Nollet ne manquait pas de bon sens dans ses critiques contre les partisans de Fran-

klin qui croyaient résolu un problème qui est loin de l'être de nos jours, et les rieurs devaient être de son côté lorsqu'il écrivait : « Quelques personnes même assuraient, d'un ton fort sérieux, qu'un voyageur en rase campagne pourrait s'en défendre [de la foudre] en mettant l'épée à la main contre la nuée ; les gens d'Église, qui n'en portent pas, commençaient à se plaindre ; mais on leur montra dans le livre de M. Franklin, qui était comme l'Évangile du jour, *qu'on pourrait suppléer au pouvoir des pointes, en laissant bien mouiller ses habits*. Ce qui est extrêmement facile en temps d'orage. » On avait tort de nier l'effet du paratonnerre, mais il fallait en perfectionner la construction. En France, la mode contribua plus que la technique à convaincre les incrédules : pendant son séjour à partir de 1776, Franklin sut se rendre l'homme le plus populaire de Paris ; il ne fut plus possible de douter de la réalité de son invention, qui d'ailleurs était déjà corroborée par de nombreux succès.

FIN DE LA PÉRIODE DES
EXPÉRIENCES QUALITATIVES. A partir de 1760, quelques nouveaux perfectionnements de la machine électrique, des effets de plus en plus puissants, mais toujours les mêmes, sont tout ce que l'on trouve jusqu'à Volta, qui devait introduire l'idée de *tension* et finalement découvrir la pile, et à Coulomb, qui allait ouvrir la période des expériences *quantitatives*. Déjà, on sentait vaguement qu'il fallait *mesurer* quelque chose, mais on ne savait pas au juste quoi. Dans un de ses ouvrages, Nollet remarque que, tandis que l'on se sert de thermomètres pour mesurer la chaleur, de balances pour mesurer les poids, il n'existe pas d'appareils pour mesurer l'électricité ; il ignorait ce qu'il fallait mesurer, mais il sentait que la période des recherches qualitatives était close et qu'il fallait introduire des données numériques. La difficulté n'était pas tant de trouver les appareils nécessaires pour cela que de choisir judicieusement ce qui devait être l'objet des mesures. Le génie de Coulomb devait résoudre l'un et l'autre de ces deux problèmes et ouvrir une ère nouvelle dans la science de l'électricité.

V

LE MOUVEMENT ET LA RÉSISTANCE DES FLUIDES

VARIÉTÉ DES TRAVAUX SUR CETTE QUESTION A cette branche de la physique se rattachent, à l'époque où nous sommes arrivés, des travaux extrêmement divers, allant depuis les hautes mathématiques avec d'Alembert jusqu'à l'architecture ; les applications, qu'il n'était pas encore possible de prévoir toutes, devaient, plus tard, être excessivement variées, comprenant une partie importante de la balistique, de l'art de la navigation, des travaux hydrauliques, et enfin de l'aviation. Il n'est pas possible d'exposer ici tous les travaux faits au dix-huitième siècle dans cette branche de la science qui est un peu en marge de la physique ; il convient cependant de montrer ici quel rôle brillant notre pays y a joué.

RECHERCHES MATHÉMATIQUES Au dix-septième siècle, Torricelli avait posé les premières lois de l'écoulement des liquides, et Mariotte, l'un des premiers, avait expérimenté avec précision sur ce sujet, sans négliger les enseignements des artisans, en essayant au contraire de les préciser. La fondation définitive de la mécanique n'amena d'abord pas dans cette science les progrès que l'on aurait pu espérer ; Newton donna un aperçu ingénieux sur la résistance qu'éprouve un corps solide que l'on déplace dans un fluide, et annonça que cette résistance croît comme le carré de la vitesse, ce qui est, en effet, sensiblement exact entre certaines limites ; malheureusement l'aperçu de Newton fut considéré par beaucoup de ses admirateurs comme donnant dans tous les cas la loi exacte de la résistance, alors qu'elle ne donne souvent qu'une valeur extrêmement erronée. En particulier, dans les problèmes qui se posèrent à la fin du dix-neuvième siècle, lors des débuts de l'aviation, l'aperçu de Newton donne des valeurs qui n'ont pas le moindre rapport avec la réalité, ainsi que devait l'établir Borda ; cela n'empêcha pas quelques-uns des rares savants qui s'intéressèrent à l'aviation naissante de se servir de ces lois de Newton pour démontrer l'impossibilité du vol par le « plus lourd que l'air ».

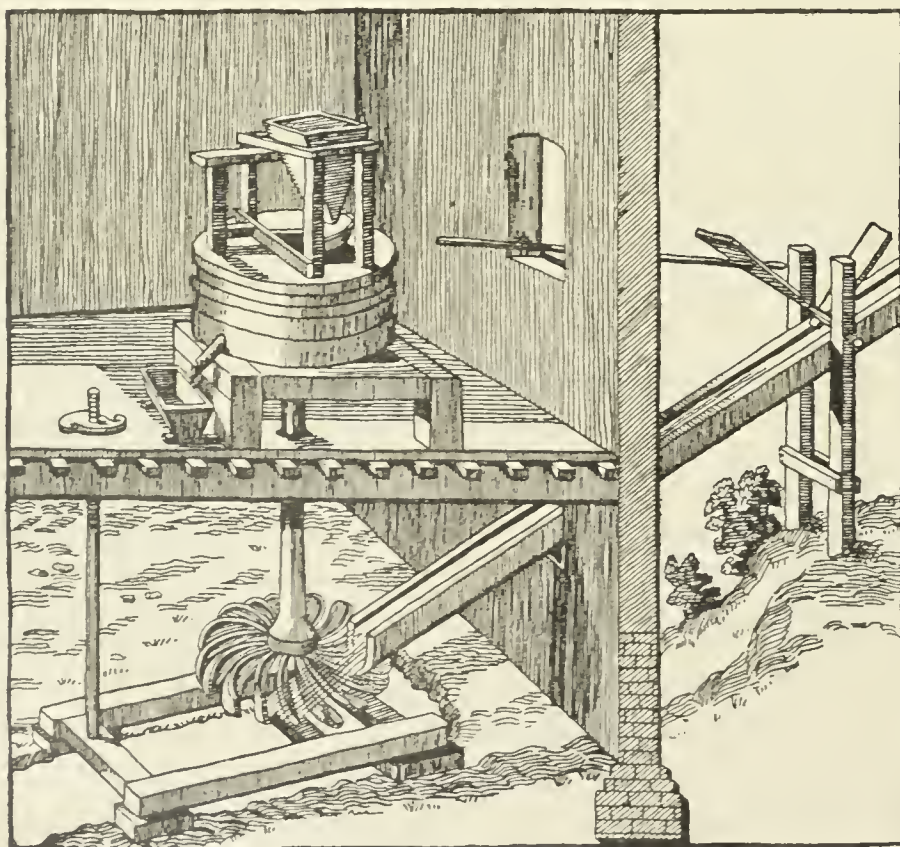
Ce n'est qu'en 1744 que d'Alembert écrivit, dans toute leur précision, les équations de la mécanique des fluides ; toute l'hydraulique y était contenue, mais sous une forme si compliquée qu'il était impossible de l'en faire sortir. Déjà cependant

Daniel Bernoulli, dans son traité d'hydrodynamique publié à Strasbourg en 1738, était arrivé par la dynamique à quelques résultats intéressants ; les études de Clairaut sur « la figure de la Terre » se rattachent au même point de vue. C'est aux équations établies par d'Alembert que se rattachent aussi les travaux sur l'équilibre et le mouvement des fluides, de Lagrange, de Laplace et jusqu'à nos jours, de Poincaré et de Duhem ; mais c'est à l'histoire des mathématiques qu'appartiennent ces travaux, qui en somme n'eurent que peu d'influence sur l'étude expérimentale des fluides.

A **RCHITECTURE** **HYDRAULIQUE** A l'autre aile de la même armée, nous trouvons les travaux des purs ingénieurs ou architectes hydrauliciens. Parmi ceux-ci, il faut particulièrement citer Bélidor, dont le beau *Traité d'architecture hydraulique* a été, pendant un siècle, le bréviaire des hydrauliciens. Né en 1693, Bélidor s'occupa aussi d'artillerie et de fortification ; après avoir été professeur à l'école d'artillerie de la Fère, et avoir fait plusieurs campagnes, il devint inspecteur de l'artillerie, et publia des ouvrages estimés sur la balistique et l'art militaire ;

mais c'est comme hydraulicien qu'il mérite d'être connu. Son *Architecture hydraulique*, publiée pour la première fois en 1737-1739, est un magnifique ouvrage illustré de belles planches. Complété en 1750-53, il est traduit en allemand, et, bien après la mort de l'auteur, imité par Prony en 1790-1796 et réimprimé jusqu'en 1819 par Navier.

Parmi les questions qu'étudie Bélidor, il en est qui sont, plus que jamais, à l'ordre du jour,



DESSIN D'UN MOULIN COMME ON LES FAIT EN PROVENCE ET EN DAUPHINÉ. (D'après l'*Architecture hydraulique* de Bélidor).

telle celle des « moulins à marée », destinés à produire de la force motrice en utilisant le flux et le reflux de la mer. « L'invention des moulins à marée, écrit Bélidor, est due à un nommé Perse, maître charpentier à Dunkerque. Il y avait en 1737 dans cette ville un moulin qui avait huit meules, dont six tournaient par le moyen de la mer et les



CHAPELET EMPLOYÉ A MARSEILLE POUR ÉPURER LES EAUX EN UTILISANT LE TRAVAIL DES FORÇATS. (D'après Bélidor).

deux autres par le vent... » Après avoir décrit cette machine, Bélidor indique des solutions plus parfaites, qui ressemblent beaucoup à celle que l'on réalise en ce moment sur nos côtes de Bretagne.

LES LOIS DE L'ÉCOULEMENT DES FLUIDES

Entre les « mathématiciens » et les « architectes » se placent les nombreux ingénieurs et savants qui étudient ou exposent les mouvements des fluides avec des préoccupations fort diverses. Les uns, comme Pitot, Chézy, du Buat, surtout ingénieurs, ont comme but d'arriver à des formules immédiatement utiles dans les applications et prennent surtout comme guide l'expérience ; d'autres, plus mathématiciens, comme Bossut, cherchent, dans la mesure du possible, à prendre comme base les équations de la mécanique. Bien que ces travaux s'étendent en partie sur la période suivante, on va en raconter ici l'ensemble pour ne pas en interrompre l'exposé.

Le problème qui s'impose le plus immédiatement à l'attention des ingénieurs est la détermination du débit d'une rivière, d'un canal, d'un tuyau destiné à conduire l'eau. Les « fonteniers » avaient bien là-dessus quelques indications grossières, que Mariotte, loin de les dédaigner, avait essayé de préciser. Pour la mesure de ce débit, Pitot, ingénieur en chef en Languedoc, invente le curieux appareil encore connu sous le nom de « tube de Pitot ». Mais l'art de l'ingénieur ne peut se contenter de mesurer ce qui existe ; il doit surtout prévoir ce qui se passera dans un ouvrage non encore construit, afin d'adapter le plan de l'ouvrage au but poursuivi. Il fallait donc arriver à des formules permettant de calculer d'avance le débit d'un canal

dont on connaît la pente et la section. On trouve les premières idées claires et utilisables dans le traité d'hydrodynamique de Bossut, publié en 1771 ; c'est là que l'influence du frottement de l'eau sur les parois est, pour la première fois, prise en considération. Ces travaux avaient d'ailleurs valu à leur auteur une grande renommée. En 1768 le roi avait fondé pour lui, au Louvre, une chaire d'hydraulique, et ce seul fait montre quel intérêt s'attachait en France aux recherches de ce genre.

C'est à deux ingénieurs, l'un du service des ponts et chaussées, l'autre du génie militaire, qu'est due la formule la plus importante de l'hydraulique pratique, celle dont on se sert encore aujourd'hui.

Antoine Chézy, né à Châlons-sur-Marne d'une famille très modeste, entra en 1748 dans l'administration des ponts et chaussées alors dirigée d'une manière intelligente et libérale par Trudaine. L'année suivante il devenait élève de l'École des ponts et chaussées, où il fut remarqué par Perronet qui en était le premier directeur. Il occupa diverses fonctions dans le corps des ponts et chaussées, devint inspecteur général et participa à tous les grands travaux exécutés de son temps. Il se retira à Versailles en 1790. Sans autre ressource qu'une maigre pension de retraite qui lui était payée en assignats, il tomba dans une profonde misère et fut heureux d'accepter, grâce à la protection de son ancien élève de Prony, un très modeste emploi dans l'administration du cadastre, qui lui valait un petit traitement « en nature » (vivres et vêtements). Ses amis purent enfin le faire réintégrer dans un poste plus honorable ; en 1797 il fut nommé directeur de l'École des ponts et chaussées (il avait alors 79 ans) ; il mourut l'année suivante et fut remplacé par Prony.

Ses études sur le débit des canaux furent entreprises en 1778 à l'occasion de la préparation du projet d'amener à Paris les eaux de la petite rivière l'Yvette, qui coule dans la vallée de Chevreuse. Ce projet, défendu par le mathématicien Déparcieux, était séduisant, parce que le niveau de la rivière est plus élevé que celui de la ville ; il donna lieu à de longues discussions et fut l'occasion d'importantes recherches d'hydraulique. C'est pour calculer la section qu'il faudrait donner au canal projeté que Chézy commença ses recherches d'hydraulique et découvrit la formule encore employée aujourd'hui. Son travail ne fut pas publié ; il fut seulement exposé dans un rapport à Perronet et connu des ingénieurs des ponts et chaussées. Le projet de l'Yvette ne fut d'ailleurs pas exécuté, et c'est seulement en 1803, à propos d'un autre projet, celui du canal de l'Ourcq, qu'un rapport imprimé parla de la découverte de Chézy.

Pendant ce temps, la même formule avait été retrouvée par du Buat qui, très probablement, ne savait rien des travaux de Chézy. Né en 1734, il était le frère



EXPÉRIENCE DE L'ABBÉ NOLLET (ÉLECTRISATION DU CORPS HUMAIN)
(D'après une gravure de Sueur).

du comte Louis-Gabriel du Buat-Nançay, connu comme diplomate et comme historien ; il était officier du génie et avait le grade de colonel lorsqu'il publia ses *Principes d'hydraulique* dont la première édition est de 1779 et la seconde, beaucoup plus étendue, de 1786. Elle a pour titre : *Principes d'hydraulique vérifiés par de nombreuses expériences faites par ordre du gouvernement*. C'est, en effet, par des expériences simples et bien conduites, généralisées ensuite par des calculs judicieux, que du Buat parvient à démêler les lois des phénomènes qu'il étudie. On ne peut s'empêcher de rapprocher sa méthode de travail de celle du grand physicien Coulomb, qui appartenait au même corps. Du Buat arrive à résoudre complètement, avec de nombreux exemples numériques, les problèmes qu'offre la pratique ; la formule de Chézy est l'une de celles qu'il découvre.

L A RÉSISTANCE DES FLUIDES Un autre problème, plus difficile encore, et d'un intérêt qui ne devait cesser de croître, avait déjà attiré l'attention : c'est le problème de la résistance qu'oppose un fluide immobile, liquide ou gaz, au mouvement d'un corps que l'on y déplace. La théorie du navire et le calcul de la puissance nécessaire pour le mouvoir, exige la solution de ce problème dans le cas où le fluide est de l'eau ; l'étude de la résistance de l'air est à la base de la balistique et de la science de la navigation aérienne. C'est par l'étude d'un problème de balistique que Borda, dont on a déjà retracé la belle carrière, est conduit à étudier la résistance des fluides.

Le mouvement d'un projectile dans le vide était connu depuis Galilée ; mais, lorsque la vitesse est grande, ce mouvement est fortement modifié par la résistance de l'air. On n'avait, au milieu du dix-huitième siècle, que des indications extrêmement vagues sur l'influence que peut avoir cette résistance sur le mouvement réel des projectiles. Jean Bernoulli avait bien fait, sur ce sujet, des travaux purement mathématiques ; l'Anglais Robins avait bien, dès 1740, obtenu quelques résultats intéressants, développés par Euler ; en France, on se bornait à enseigner que cette résistance n'introduit, dans la loi du mouvement, qu'une perturbation négligeable. Borda, devenu en 1755 officier dans les chevau-légers et en même temps maître de mathématiques de ce corps, s'intéresse aux questions de balistique ; en 1756, il envoie à l'Académie son premier *Mémoire sur le jet des bombes*, qui inaugure ses travaux sur la résistance des fluides. Il montre que la résistance de l'air joue un rôle capital dans les questions de balistique, et qu'il n'est pas permis de la négliger. Abandonnant bientôt le problème particulier de la balistique, il se met à expérimenter sur cette résistance, et invente pour cela la méthode reprise à la

fin du dix-neuvième siècle sous le nom de « méthode du manège ». Le corps sur lequel on veut mesurer la résistance est fixé à la périphérie d'une grande roue, que l'on fait tourner, et l'on mesure la vitesse qui lui est communiquée par une force connue. Par ce moyen très simple, il rectifie plusieurs des résultats de Newton, et en particulier ceux qui sont relatifs au mouvement d'un plan mince que l'on déplace obliquement dans l'air. L'intérêt pratique des questions de résistance de l'air était alors confiné au mouvement des projectiles ; il était trop tôt pour que l'on pût soupçonner l'importance que prendrait cette résistance dans les questions d'aviation. Les lois énoncées par Newton n'auraient laissé aucun espoir, si l'on s'était posé le problème, à la sustentation par le plus lourd que l'air ; Borda est le premier qui ait donné des valeurs à peu près exactes, qui auraient pu être utilisées par les fondateurs de l'aviation si ses travaux n'avaient pas été oubliés.

Cependant, Borda, envoyé à Dunkerque, commençait à s'intéresser aux choses de la mer ; de la résistance de l'air il est conduit à celle de l'eau. Au milieu de mille occupations diverses, coupées par la guerre, il expérimente tout de même. Ses résultats ne se laissent pas relier par des formules simples. Il étudie ensuite l'écoulement des liquides, et enfin, les roues hydrauliques et les pompes. Deux marins, Thévenard, puis Marguerie, continuent ces recherches en ayant surtout en vue leur application au mouvement des navires.

Les questions de résistance des fluides occupent aussi une grande place dans l'ouvrage de du Buat ; selon son habitude, l'auteur traite à fond chacun des problèmes qu'il se pose et pousse la solution jusqu'aux résultats numériques. Quelques-uns de ces problèmes sont si voisins de ceux que pose le développement de l'aviation que l'on peut se demander si l'auteur n'a pas eu comme un pressentiment de l'avenir de cette science. Voici, dans la deuxième édition de son livre, l'énoncé de ce que nous appellerions le « problème du parachute » :

« *Problème.* — On demande quelle étendue doit avoir une surface mince et « légère, propre à modérer la chute d'un homme qui tomberait dans l'air, d'une « grande hauteur, pour qu'il ne soit pas blessé par la commotion qui termine la « chute. »

La solution est conduite avec une méthode vraiment impeccable : « Nous prendrons le pied et la livre comme unités de mesure... Nous supposerons que le poids de l'homme est de 150 livres et celui de la machine de 30... Quant à la vitesse, nous observerons qu'un homme peut tomber sur ses pieds, sans se blesser, d'une hauteur de 6 pieds... Sa vitesse est alors de 19 pieds par seconde : c'est à ce terme que nous fixerons la plus grande vitesse admissible. »

Appliquant alors les formules déduites de ses expériences, il trouve que la « machine » doit avoir une surface de 255 pieds carrés ; si elle est circulaire, son diamètre sera de 18 pieds. Il n'est pas sans intérêt de comparer ce résultat avec celui que donnent les formules modernes ; on trouve, en prenant les valeurs les plus probables des coefficients qui y entrent, que le diamètre devrait être de 19 pieds ; autant dire que la solution de du Buat était parfaite.

L E FROTTEMENT INTERNE
OU VISCOSITÉ

A cet ensemble de résultats sur le mouvement des fluides, il manquait encore la connaissance et la définition précise de la propriété connue aujourd'hui sous le nom de « frottement interne » ou « viscosité », qui s'oppose aux inégalités de vitesse entre les différentes couches d'un fluide en mouvement, et qui joue le principal rôle dans les mouvements lents des liquides et des gaz. C'est seulement dans la période suivante que cette propriété fut clairement étudiée par Coulomb, un homme de la même génération et de la même formation que du Buat, nouvel exemple des beaux résultats que devait donner, dans la science pure, le travail d'hommes ne perdant pas de vue les applications.



TÉLESCOPE GREGORIEN



CHAPITRE IV

LA FONDATION DE LA PHYSIQUE MODERNE

(1780-1825)

I. Le milieu et les hommes. Les écoles techniques et scientifiques. — II. La fondation du système métrique. — III. La chaleur et les propriétés des fluides. La propagation de la chaleur. Fourier. — IV. L'électrostatique et le magnétisme. Coulomb. — V. Le courant électrique. La pile de Volta. L'électromagnétisme et l'Ecole française. Ampère. — VI. Les progrès de l'optique. Fresnel et la théorie de la lumière. Les phares. Conséquences de l'œuvre de Fresnel. — VII. La cristallographie. Romé de Lisle. Haüy. — VIII. Les applications. La machine à vapeur. Les aérostats. La télégraphie optique.

I

LE MILIEU ET LES HOMMES



Si arbitraires que soient les frontières chronologiques que l'on peut tracer dans l'histoire de la physique, c'est aux années qui ont précédé la Révolution qu'il faut faire remonter les débuts de la physique moderne, avec les caractères qu'elle a encore aujourd'hui. L'expérimentation, seule base solide pour la recherche scientifique, n'était certes pas un procédé nouveau ; mais à partir de cette époque, elle prend un caractère de plus en plus précis, elle abandonne l'étude purement qualitative pour rechercher toujours ce qui peut se traduire en nombres, elle vise à trouver comment les choses se passent plus encore qu'à savoir pourquoi elles se passent ainsi.

L'outil mathématique, qui a fait ses preuves dans la création de la mécanique céleste, est maintenant assez parfait pour être utilisé dans les questions de physique les plus variées. Les explications purement verbales sont de plus en plus délaissées, tandis que l'intérêt se porte sur celles qui peuvent être traduites par des résultats numériques. Enfin, le souci des applications reste presque toujours présent, même lorsque les recherches elles-mêmes ne sont pas inspirées par quelque problème d'ordre pratique.

Cette transformation de la physique n'est pas l'œuvre d'un homme ; c'est une œuvre collective, à laquelle tous les pays ont plus ou moins contribué. Chez nous, elle est menée par le groupe d'hommes de science le plus actif que nous ayons jamais possédé.

LES TECHNICIENS L'usage constant des mathématiques pour coordonner
MATHÉMATICIENS les résultats de l'expérience est, dans la physique française de cette époque, la caractéristique la plus remarquable. L'instrument mathématique, avons-nous dit, était constitué ; de plus, il était chez nous assez vulgarisé pour servir effectivement au progrès de la physique. Cette diffusion était, pour une bonne part, l'œuvre des écoles techniques, civiles et militaires, fondées successivement au cours du dix-huitième siècle pour le recrutement des services de l'État, puis de l'École polytechnique qui, en ce qui concerne l'enseignement, était le prolongement direct de ces écoles de l'ancien régime. Presque tous les hommes dont le nom compte dans l'histoire scientifique de l'époque que nous étudions avaient quelque lien avec l'une de ces écoles. Une forte instruction mathématique, le souci des réalités plus encore que des systèmes philosophiques, tels étaient les caractères communs de leur esprit.

Les lois de la mécanique leur étaient familières ; elles n'étaient plus un sujet de discussion, comme cela avait eu lieu pendant presque tout le dix-septième siècle, mais une base solide pour toutes les recherches. La mécanique céleste offrait déjà un magnifique exemple d'application des lois de la mécanique à un ensemble grandiose de phénomènes naturels ; à l'époque où nous sommes parvenus, Laplace commençait l'immense travail qui allait faire regarder, pour un temps, la mécanique céleste comme la science mère sur laquelle toutes les autres sciences devaient prendre modèle. La mécanique des objets terrestres, beaucoup plus difficile, malgré les apparences, que celle des astres, où l'éloignement des objets masque une infinité de complications, était beaucoup moins avancée. Fortement imbus de réalités concrètes, les hommes de science de cette époque s'intéressèrent vivement à cette mécanique des corps réels. Tantôt en vue des applications immédiates, comme dans

les études d'hydraulique dont on a déjà parlé, tantôt pour des recherches purement scientifiques, comme dans les travaux de Coulomb, ils purent apporter un grand nombre de faits nouveaux et, grâce à l'outil mathématique manié d'une main sûre, les coordonner de la manière la plus harmonieuse.

Tous les chapitres de la physique ancienne allaient ainsi successivement sortir de la période descriptive pour entrer dans la période mathématique et numérique. La nécessité d'un système d'unités coordonné, les avantages du système décimal avaient déjà frappé bien des esprits ; la période révolutionnaire, rendant possible des changements que l'on n'eût pas osé envisager, allait donner l'occasion de concrétiser ces idées dans la fondation du système métrique, l'une des initiatives les plus fécondes et les plus heureuses de notre pays.

RAPPORTS AVEC LA CHIMIE A l'autre extrémité de son domaine, la physique avait été longtemps embarrassée par l'imperfection, l'incohérence même des idées sur la partie de la science aujourd'hui désignée sous le nom de chimie. Presque jusqu'à l'époque dont nous abordons l'étude, alors que les principes de la mécanique ont été énoncés avec une parfaite clarté, les idées générales sur la nature et la constitution des corps sont d'un vague, d'une imprécision qui nous déconcertent. Les faits connus sont déjà très nombreux, mais le fil conducteur pour les classer, la nomenclature pour les énoncer, manquent complètement, et cet état d'anarchie dans un domaine mal séparé du sien réagit souvent d'une manière fâcheuse sur les progrès de la physique. La chimie est comme écrasée sous la masse des faits non classés ; les notions de composé défini, de corps simple et de corps composé, étaient absentes ; ou du moins, si elles existent d'une manière latente dans quelques esprits, elles n'ont jamais été énoncées assez clairement pour servir de règles de conduite à tout le monde. Avec Lavoisier et son école, l'individualité des corps définis, leur composition à partir des corps simples, apparaissent enfin, en même temps que la distinction entre les différentes espèces d'*air* (nous disons aujourd'hui les différents *gaz*) et la reconnaissance du rôle important que jouent ces fluides dans toutes les transformations de la matière. Il ne fallut pas longtemps, chez nous, pour que ces idées claires pénétrassent dans tous les milieux s'occupant de science, et l'étude des propriétés de la matière eut enfin une base solide.

LES APPLICATIONS Les applications de la science, avons-nous dit, commencent à devenir une des préoccupations de la plupart des savants. En partie sous l'empire des nécessités, ces applications allaient devenir de plus

en plus importantes ; à leur tour, elles devaient réagir fortement sur les progrès de la science pure. D'une part, l'étude des applications devait conduire quelques grands esprits à réfléchir sur les principes généraux de la physique ; c'est ainsi que la thermodynamique a pris naissance avec les travaux de Sadi Carnot, inspirés par des réflexions d'ingénieur sur les conditions de fonctionnement de la machine à vapeur ; une des branches les plus abstraites de la science trouve ainsi son origine dans les méditations d'un homme de génie sur un problème technique. D'autre part, à chaque époque, c'est dans les moyens existant autour de lui que chaque expérimentateur doit chercher ses moyens d'action. Ces moyens, il peut les adapter à ses recherches, il peut les améliorer, mais la vie humaine est trop courte et les ressources matérielles dont dispose chaque homme sont trop limitées pour qu'il puisse en créer d'entièrement nouveaux, hors de proportion avec les moyens dont disposent ses contemporains. A ce point de vue, la science expérimentale d'une époque est en partie limitée par les moyens matériels dont cette époque dispose, par l'état de l'industrie de cette époque, moyens matériels qu'elle contribue elle-même à développer. Nous avons déjà vu les habiles ouvriers du dix-huitième siècle apporter une aide utile aux recherches des savants ; les progrès de l'industrie allaient rendre cette aide de plus en plus efficace, au moins entre les mains de ceux qui surent l'utiliser. « Il n'existe pas, disait Pasteur, une catégorie de sciences auxquelles on puisse donner le nom de sciences appliquées. Il y a la science et les applications de la science, liées entre elles comme le fruit à l'arbre qui l'a porté. » Liaison encore plus étroite, pourrait-on dire, car si les applications sont le fruit de la science, elles réagissent à leur tour sur la science elle-même en donnant au savant de nouveaux moyens d'action, parfois même en lui suggérant de nouveaux sujets de méditations et de recherches, auxquels il n'aurait peut-être jamais pensé.

L ES ÉCOLES TECHNIQUES ET SCIENTIFIQUES

Ce n'était pas une idée nouvelle, à l'époque de la Révolution, que la nécessité d'une solide instruction scientifique, et en particulier mathématique, pour les techniciens. Successivement, au cours du dix-huitième siècle, avaient été fondées plusieurs écoles pour le recrutement des techniciens de l'armée, de la marine, des travaux publics. Le niveau intellectuel devait y être fort élevé, avec des maîtres comme Laplace, Monge, Borda et des élèves comme Coulomb, Borda, Meusnier, Carnot. Les hommes qui mènent le mouvement scientifique pendant la période de la Révolution sont les hommes de ces écoles de l'ancien régime. La Révolution fit disparaître ces écoles ; leur influence ne s'éteignit pas pour cela. En créant l'École polytechnique (d'abord désignée sous

le nom d'École centrale des travaux publics) en 1794, la Convention ne fit pas autre chose que de les unifier, les systématiser, en même temps qu'elle élargissait sur toutes les classes de la nation les bases du recrutement. L'esprit politique était nouveau, mais en ce qui concerne l'organisation des études, la nouvelle école était bien le prolongement naturel des anciennes ; comment eût-il pu en être autrement, puisque les hommes étaient les mêmes ? Nous y retrouvons comme professeurs, Monge, ancien élève et ancien professeur de l'École du génie de Mézières, Prony, ancien élève de l'École des ponts et chaussées, collaborateur de Perronet, Lagrange qui avait débuté à l'École d'artillerie de Turin, peu différente des écoles françaises. Quelles que fussent leurs opinions et leur rôle politique, tous ces hommes étaient fortement imbus de culture mathématique, et ne pouvaient que continuer, en l'accentuant, l'orientation des anciennes écoles. La systématisation mathématique fut même, dès le début, poussée si loin que le but pratique fut peut-être un peu dépassé et que le lien avec les réalités fut peut-être un peu trop relâché. Aussi les anciennes écoles techniques durent-elles reparaître, sous le nom d'écoles d'application, pour achever la formation spéciale des jeunes gens à qui l'École polytechnique avait donné une instruction mathématique qui n'avait d'équivalent nulle part. On peut regretter que, plus tard, ce magnifique ensemble d'écoles n'ait pas su évoluer vers les régions les plus actuelles de la science ; on ne peut nier que, pendant les trente premières années de son existence il ait fourni à notre pays une admirable phalange d'hommes de science, d'ingénieurs et d'esprits distingués aptes à comprendre tous les progrès.

Cette création de la Révolution était viable, peut-être parce qu'elle était solidement appuyée sur le passé et s'adressait aux classes les plus éclairées de la Nation. D'autres tentatives intéressantes mais moins heureuses doivent être rapidement signalées ici ; leur influence ne fut pas négligeable, mais fut beaucoup plus éphémère.

Préoccupée de développer l'instruction à tous les degrés, la Convention nationale décréta, en 1794, la création à Paris d'une École normale où enseigneraient tout ce que la République comptait de savants illustres et où viendraient les écouter, pendant quelques mois, tous les citoyens destinés à porter l'instruction dans les villes et dans les campagnes. L'idée était belle ; elle manquait peut-être de base pratique. Quinze cents élèves vinrent écouter les leçons de Lagrange, Laplace, Haüy, Berthollet, Daubenton, Volney, Bernardin de Saint-Pierre, La Harpe, etc. Les élèves étaient probablement trop nombreux et trop peu préparés, les professeurs peut-être trop savants. Le succès fut médiocre, et l'école ne fut pas rouverte l'année suivante.

D'autre part, pour répandre l'instruction sur tout le territoire de la République,

la Convention avait décrété en 1795 la création, dans chaque département, d'une « École centrale », destinée à l'enseignement des sciences, des lettres et des arts. Le programme était vaste et assez mal défini ; dans beaucoup de départements, l'École centrale ne put être ouverte faute de maîtres et d'élèves ; d'autres végétèrent et toutes devinrent des *lycées* en 1802. N'oublions pas cependant qu'à leur souvenir se rattachent quelques noms illustres. C'est dans l'une d'elles, celle de l'Ain, que le jeune Ampère, désespéré par la mort tragique de son père, trouva la modeste situation de professeur de physique qui lui permit de vivre et de développer sa vocation scientifique. C'est à celle de Caen que Fresnel, enfant indocile et peu précoce dans ses études, reçut d'excellents professeurs les premières leçons qui ouvrirent son esprit aux beautés des sciences.

Quant à ce que nous appelons aujourd'hui l'enseignement supérieur universitaire, il n'y a rien à en dire, pour la période qui nous occupe, parce que, du point de vue qui nous intéresse, il fut inexistant. Purement théologique et formel avant la Révolution (en dehors d'une ou deux exceptions, comme l'enseignement expérimental de Nollet et de son successeur Brisson au collège de Navarre), il n'existe pas davantage sous la Révolution, sous l'Empire, ni même pendant la première moitié du dix-neuvième siècle. Le gouvernement impérial avait, il est vrai, fondé en 1808 une Faculté des Sciences et une Faculté des Lettres, pour chaque chef-lieu d'académie, sorte d'annexe du lycée ; en ce qui concerne la physique, leur rôle fut longtemps à peu près nul. C'était un esprit administratif étroit, et non plus celui de Monge, de Berthollet et de Lagrange qui avait présidé à leur création ; il ne semble pas que les fondateurs aient songé un seul instant au progrès de la science.

La même année (1808) était fondée l'École normale supérieure, destinée en principe au recrutement du personnel enseignant des lycées. Ce n'est que dans la période suivante que les hommes sortis de cette école commencèrent à jouer un rôle marquant dans l'histoire de la physique.

II

LA FONDATION DU SYSTÈME MÉTRIQUE

TENTATIVES ANCIENNES La nécessité d'un système d'unités précis et invariable était vivement ressentie en France bien avant l'époque à laquelle nous sommes arrivés. Nous avons déjà vu les savants du dix-septième

siècle, lorsqu'ils voulurent entreprendre des mesures précises sur les dimensions de la Terre, adopter l'unité de longueur (la toise de Paris) en usage dans les transactions commerciales, et s'apercevoir que cette unité était beaucoup trop mal définie pour les besoins scientifiques ; ils furent obligés de la préciser tout en la copiant le mieux possible, et ce fut cette copie qui leur servit dans leurs expériences. La belle série de mesures faites au dix-huitième siècle par les savants français, tant dans leur pays que dans des expéditions lointaines, avait montré d'une manière encore plus impérieuse l'imperfection des règles métalliques alors employées pour définir la toise.

En même temps, les besoins du commerce avaient fait apparaître la nécessité d'une réforme. Les unités employées variaient d'une province à une autre, et cette diversité dut causer de grandes difficultés dès que le commerce cessa d'être étroitement local. Des tentatives d'unification sous Philippe le Bel, sous Louis XI, sous François I^{er} avaient complètement échoué, et encore au dix-huitième siècle de grandes différences existaient, de province à province, sur la longueur de la toise et du pied, sur le poids de la livre et du quintal. Peu à peu, nous voyons les idées se préciser et les tentatives de réforme prendre un caractère plus scientifique. Avant d'entreprendre un changement, il était utile de savoir exactement quels étaient les usages des diverses provinces ; c'est ce qu'essaya de faire Philibert Orry, contrôleur général des finances. Le physicien du Fay, qui avait été chargé de comparer entre elles les unités employées dans les diverses parties du royaume, mourut en 1739 avant d'avoir achevé ce travail, qui ne paraît pas avoir été repris. Un peu plus tard en 1766, sur l'ordre de Trudaine, on chargea Tillet, directeur de la monnaie de Troyes et membre de l'Académie des sciences, de faire construire quatre-vingts exemplaires de la toise de Paris, copiés sur la règle qui avait servi de base aux mesures de l'arc de méridien faites au Pérou. On envoya ces toises, avec des copies de l'aune et du marc, aux différents Parlements ; cette tentative d'unification ne paraît avoir produit aucun résultat. C'est une réforme beaucoup plus profonde qui devait aboutir.

Dans les milieux scientifiques, la question de la réforme des unités avait déjà donné lieu à de nombreuses études ; elle était mûre lorsque les circonstances en amenèrent la réalisation. On peut dire que la réforme devait porter sur trois points essentiels : unification des mesures, définitions plus précises des unités, emploi du système décimal.

DÉSIR D'UNIFICATION L'ancien régime, dans les timides tentatives qui avaient été faites, avait eu seulement en vue l'unification dans l'étendue du royaume. La Révolution devait aussitôt envisager le problème d'un

point de vue plus élevé, et essayer de réaliser l'unification dans tous les pays civilisés. Il était dès lors évident qu'il fallait renoncer aux unités existantes ; s'il avait paru impossible de faire adopter la toise de Paris en Lorraine ou en Provence, comment espérer que l'on pourrait la faire adopter hors de France ? La même objection devait s'appliquer à toute unité choisie d'une manière arbitraire ; le seul espoir de succès était dans le choix d'une unité empruntée, au moins en apparence, à quelque phénomène naturel, appartenant indistinctement à tous les pays. Un tel choix pouvait aussi se justifier par le désir d'assurer une permanence indéfinie aux unités choisies et de les mettre à l'abri de toute chance de disparition.

Ces idées avaient été déjà agitées depuis plus d'un siècle, et diverses solutions avaient été envisagées. Malheureusement, peu de phénomènes naturels étaient alors assez bien connus pour pouvoir fournir une base sûre et précise aux unités de mesure. En réalité, deux solutions seulement avaient été proposées. L'une consistait à prendre comme unité la longueur du pendule qui bat la seconde ; déjà Picard et ses contemporains y avaient pensé. Un peu plus tard, on apprit que cette longueur varie d'un lieu à un autre, et que par suite cette unité n'est pas aussi universelle qu'on l'avait cru ; la nécessité d'introduire un nom de lieu dans la définition, de dire par exemple que le pendule doit faire son oscillation à Paris, eût été une grande difficulté pour l'adoption universelle de l'unité ainsi définie. L'autre solution consistait à prendre comme point de départ les dimensions de la terre. C'est, comme nous allons le voir, cette dernière solution qui fut adoptée, et sa simplicité apparente, son caractère d'universalité pour tous les habitants de notre planète fut certainement une des raisons qui devaient permettre la large diffusion du nouveau système de mesures dans le monde.

NÉCESSITÉ D'UNE PRÉCISION ACCRUE La précision des mesures avait déjà fait de grands progrès ; il fallait que les unités fussent définies avec une précision de plus en plus grande. Les règles dont on s'était servi jusqu'alors comportaient une incertitude de l'ordre du dixième de millimètre ; c'était, au milieu du dix-huitième siècle, la limite de précision que l'on croyait pouvoir atteindre. Il fallait faire mieux, et cela était facile à l'époque où la réforme fut entreprise. Déjà le centième de millimètre n'était plus considéré comme d'une petitesse inaccessible. Il valait mieux, pour éviter toute ambiguïté, adopter des mesures entièrement nouvelles que d'essayer d'améliorer les anciennes, trop mal définies.

SYSTÈME DÉCIMAL L'idée du système décimal, déjà bien des fois émise, mais toujours considérée comme irréalisable, allait être reprise et enfin réalisée sans soulever la moindre opposition dans les assemblées politiques ou scientifiques qui allaient avoir à se prononcer sur son adoption. Comment cette réforme si profonde fut-elle aussi facilement acceptée ? Tout simplement parce que, du moins dans les milieux scientifiques, elle était déjà plus qu'à moitié réalisée. Il suffit de parcourir les Mémoires scientifiques des années qui ont précédé la Révolution pour s'apercevoir que, dans leurs calculs, les savants et les techniciens ne se servaient jamais des subdivisions compliquées en toises, pieds, pouces et lignes ou en livres, onces et gros, mais employaient uniquement le système décimal à partir de l'une des unités ordinaires.

Voici, par exemple, le célèbre Mémoire de Lavoisier et Laplace sur la chaleur (1780). On y voit fréquemment le résultat d'une pesée, faite évidemment avec les instruments ordinaires que livraient les marchands de balances, où les boîtes de poids étaient divisées en livres, onces, gros et grains ; mais aussitôt obtenu, le poids est transformé en livres et fractions décimales de cette unité. S'agit-il, par exemple de l'échantillon de tôle qui va servir à déterminer la chaleur spécifique du fer, on lit : « Ainsi, le poids entier de la masse de tôle était 7 livres 11 onces 2 gros 36 grains, ou 7, 707 039 livres. »

Voici maintenant l'œuvre d'un technicien, du Buat, officier du génie, ancien élève de l'École de Mézières qui, dans ses *Principes d'hydraulique* (deuxième édition, 1786), aborde les questions les plus complexes de la résistance des fluides. Il sent bien que l'emploi des subdivisions d'unités en usage chez les marchands créerait dans ses calculs, déjà compliqués par eux-mêmes, des difficultés inextricables. Aussi, pour chaque problème, fait-il choix d'un système d'unités simple et bien défini, en des termes auxquels un physicien moderne n'aurait à changer que le nom des unités : « Nous prendrons le pied et la livre comme unités de mesures » ; et il n'est plus question que de fractions décimales du pied et de la livre, sans que jamais s'y mêlent des onces ou des pouces.

L'emploi du système décimal n'était certainement pas aussi répandu chez les artisans ou les marchands ; mais leurs calculs n'étaient pas bien compliqués, et comme on ne leur demanda pas de changer immédiatement leurs habitudes, personne ne protesta contre la réforme proposée.

P RÉPARATION DE
LA RÉFORME

La préparation de cette réforme exigea près de dix années. La question était si bien à l'ordre du jour que les cahiers d'un grand nombre de bailliages, aussi bien du clergé et de la noblesse que du tiers-état, demandent une refonte des poids et mesures ; c'est surtout la question de l'uniformité dans tout le royaume qui paraît intéresser les électeurs. Sans entrer ici dans le détail de l'histoire administrative et législative de la grande réforme, histoire assez touffue où les perturbations politiques s'enchevêtrent avec les recherches scientifiques entreprises dans des conditions très difficiles, rappelons que c'est Talleyrand, alors évêque d'Autun et député du clergé, qui déposa, en 1790, à l'Assemblée constituante, le premier projet de loi sur les poids et mesures. Talleyrand s'y inspire d'une publication d'un jeune lieutenant du génie, Prieur-Duvernois, qui devait plus tard jouer un rôle politique comme député à l'Assemblée législative et à la Convention, et prendre une part importante dans l'établissement du système métrique. Le projet de Talleyrand contient déjà plusieurs des dispositions qui ont fait le succès de notre système métrique ; l'auteur y insiste sur la nécessité de rendre les unités internationales, et le rapporteur du projet, le marquis de Bonnay, député de la noblesse du Nivernais, écrit non sans optimisme : « L'Angleterre est prête à se joindre à nous pour exécuter cette uniformité. Quand ces deux nations, qui n'ont de rivales qu'elles-mêmes, l'auront adoptée, toute l'Europe ne manquera pas de l'adopter aussi ». On se faisait d'ailleurs d'étranges illusions sur la facilité avec laquelle le changement proposé pourrait être effectué : un décret sanctionné par le roi le 22 août 1790 prévoit un délai de six mois pour la disparition définitive des anciennes unités.

On était, dès ce moment, d'accord pour adopter les divisions décimales, pour choisir une unité de longueur entièrement nouvelle, pour prendre comme unité de poids celui d'un volume déterminé d'eau, enfin pour lier, autant que possible, la nouvelle unité de longueur à quelque phénomène naturel. L'Académie, consultée sur le choix de cette unité fondamentale, écarta la définition par le pendule qui faisait intervenir un élément, le temps, étranger à la question ; elle proposa finalement de rapporter l'unité de longueur aux dimensions de la terre, et de la faire aussi exactement que possible égal à la dix-millionième partie du quart du méridien terrestre. Du point de vue purement métrologique, la question n'était que d'un intérêt secondaire ; l'unité de longueur devait, finalement, être représentée par une règle métallique, qui ne pouvait réaliser que d'une manière approximative la définition adoptée ; mais elle était d'une grande importance psychologique, pour la diffusion future du nouveau système d'unités et son adoption universelle ; à ce point

de vue, on peut dire que l'adoption d'une unité nominale liée à l'objet matériel qui est le plus directement en commun entre tous les peuples, la planète qui est leur habitation commune, fut un véritable trait de génie.

Présenté à l'Assemblée nationale en mars 1791, le rapport de l'Académie contenait, avec des propositions précises pour le choix des nouvelles unités, un programme des travaux à entreprendre pour en assurer la réalisation. Presque aussitôt, ces conclusions furent votées, et les travaux proposés furent commencés. Pour donner plus de certitude aux résultats, on décida de refaire complètement toutes les mesures nécessaires. Un arc de méridien, s'étendant de Dunkerque à Barcelone, devait être mesuré pour en déduire la valeur exacte de la nouvelle unité de longueur ; un volume d'eau exactement mesuré devait être pesé pour définir la nouvelle unité de poids.

Sans perdre un instant, l'Académie désigna ceux de ses membres qui devaient être chargés des diverses parties de ces mesures. Les astronomes Cassini et Méchain avec le mathématicien Legendre sont chargés des triangulations sur le terrain, tandis que Monge et Meusnier (tous deux appartenant à l'ancien corps du génie) mesureront les bases. Borda et Coulomb, les deux plus habiles expérimentateurs de leur temps, mesureront la longueur du pendule qui, bien que ne servant pas de définition fondamentale à la nouvelle unité, pourra fournir un contrôle utile de son invariabilité. Lavoisier et Haüy établiront la nouvelle unité de poids en pesant un volume connu d'eau. Enfin, on comparera entre elles les unités en usage dans les diverses provinces sous la direction de Tillet, Brisson et Vandermonde.

Ce ne fut pas sans secousses que le travail put être mené à bonne fin, et plusieurs des ouvriers de la première heure n'étaient plus là lorsqu'il fut achevé. Lavoisier avait presque terminé ses pesées lorsqu'il fut arrêté, puis guillotiné. La commission fut plusieurs fois « épurée » pour en éliminer ceux de ses membres qui ne paraissaient pas assez dignes de confiance « par leurs vertus républicaines et leur haine des rois », puis reconstituée et réorganisée. La partie la plus longue du travail, la mesure d'un immense arc de méridien, s'accommodait mal des conditions politiques et économiques de cette période troublée ; elle a été décrite dans ce volume à propos de l'histoire des mathématiques.

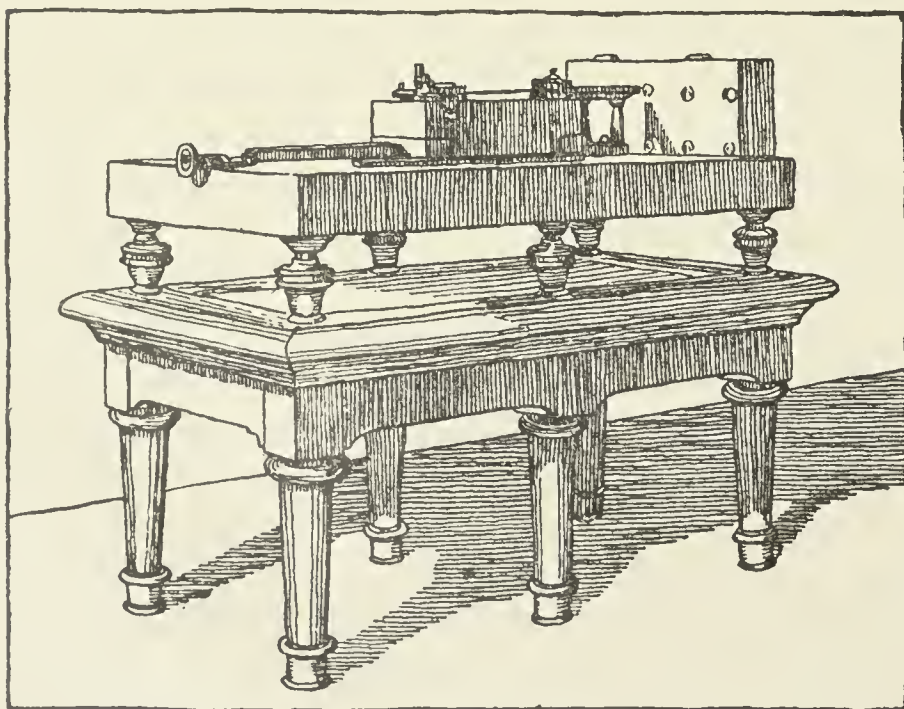
Quant à la détermination de l'unité de poids, elle était tout aussi délicate, bien que ne nécessitant pas des opérations d'aussi grande envergure que la mesure d'un arc de méridien. Le travail commencé par Lavoisier et Haüy fut entièrement recommencé par l'habile expérimentateur Lefèvre-Gineau, bientôt aidé du physicien italien Fabbroni. On se servit d'un cylindre creux en laiton, très habilement travaillé

par Fortin, dont le diamètre égal à peu près à la hauteur, était d'environ vingt-quatre centimètres. On en mesura toutes les dimensions et on détermina la perte de poids qu'il subissait lorsqu'on l'immergeait dans l'eau distillée. Ce travail délicat fut exécuté avec une précision qui, pendant un siècle, n'a pu être égalee, et qui n'a été dépassée que dans ces dernières années.

RÉALISATION MATÉRIELLE
DES NOUVELLES UNITÉS

Enfin, en 1798, les mesures destinées à asseoir les nouvelles unités étaient terminées. Il ne restait plus qu'à construire les étalons qui devaient matériellement représenter ces unités et, autant que cela était possible, à en rendre l'usage universel. L'espoir d'arriver à une entente internationale n'avait pas abandonné les ouvriers de cette grande œuvre ; le meilleur moyen pour y parvenir parut être de faire participer le plus grand nombre possible de gouvernements étrangers à la reconnaissance officielle des nouvelles unités. A la demande de l'Institut, qui avait remplacé l'Académie des sciences supprimée par un décret de la Convention, le Directoire invita les pays amis à envoyer à Paris des savants qui prendraient connaissance de tout ce qui avait été fait et contribueraient à fixer solennellement les principales unités du nouveau système. Les invitations étaient transmises par Talleyrand, ministre des Affaires étrangères, le même qui, neuf ans auparavant, étant député du clergé

à l'Assemblée nationale, avait pris l'initiative de la première proposition sur la réforme des poids et mesures. Malheureusement, le grand pays dont Talleyrand souhaitait alors la collaboration, l'Angleterre, ne fut pas représenté. La république batave, la république cisalpine, le royaume de Danemark, le royaume d'Espagne, la république helvétique, la république ligurienne, le royaume de



COMPARATEUR DE FORTIN POUR LA COMPARAISON DES RÈGLES MÉTRIQUES (D'après un dessin trouvé dans les papiers de Delambre).

Sardaigne (puis le gouvernement provisoire du Piémont), la république romaine et la république toscane envoyèrent des délégués, que l'on mit au courant de tout le travail effectué, et que l'on s'efforça d'associer aux calculs définitifs et à la rédaction des rapports. Van Swinden, délégué de la république batave, refit, en même temps que Delambre, Legendre et Trallès, tous les calculs relatifs à la mesure de l'arc de méridien et fut chargé de rédiger le rapport fixant la valeur du mètre. Trallès, délégué de la république helvétique, rédigea le rapport sur le kilogramme. Le rapport général, résumant toutes les opérations, fut rédigé par Van Swinden.

Quant à la réalisation matérielle des étalons destinés à représenter les nouvelles unités, on s'en était occupé avant l'achèvement des calculs, sous l'habile direction de Borda. On avait fait construire, pour cela, quatre règles de platine et douze règles en fer, qu'il ne restait plus qu'à ajuster pour leur donner exactement la longueur fixée par les calculs. Cette opération fut faite en se servant d'un comparateur construit par Lenoir, qui, sans atteindre la merveilleuse précision que l'on sait obtenir aujourd'hui, réalisait un grand progrès par rapport aux instruments alors en usage. Malheureusement, Borda n'était plus là pour présider au couronnement de son œuvre ; il venait de terminer sa glorieuse carrière, tout entière consacrée au service de la science et de son pays.

En même temps que les quatre règles de platine on avait fait fondre quatre cylindres du même métal qui devaient être travaillés pour représenter exactement le kilogramme.

P R É S E N T A T I O N D E S N O U V E L L E S U N I T É S

Dans les premiers mois de 1799, tout était terminé, et une délégation de l'Institut vint présenter les nouvelles unités successivement au Conseil des Anciens et au Conseil des Cinq-Cents, le 4 messidor an VII (22 juin 1799). Au nom de cette délégation, un orateur (probablement Laplace) prononça un éloquent discours où il rend un juste hommage à ceux qui ont mené à bien l'énorme travail qui venait d'être accompli, et insiste sur le caractère d'universalité des unités adoptées :

« L'Assemblée constituante, qui n'a pas toujours pu faire tout ce qu'elle aurait voulu, mais à laquelle aucune grande vue d'utilité publique n'a échappé, a d'après une motion remarquable du citoyen Talleyrand, invité l'Académie des sciences à fonder le système métrique sur une base naturelle. En effet, aucune nation, employant pour les mesures des éléments arbitraires, ne pouvait réclamer le droit, ni concevoir l'espérance de faire adopter aux autres ceux qu'elle aurait préférés.

« Il fallait donc en trouver le principe dans la nature, que tous les peuples ont

un égal intérêt à observer, et le choisir tel que sa convenance pût déterminer tous les esprits.

« L'Académie des sciences jugea que l'unité de cette mesure devait être une partie aliquote de la circonférence du globe terrestre. Elle la fixa au dix-millionième de l'arc de méridien compris entre l'équateur et le pôle boréal.

« Il y a quelque plaisir pour un père de famille à pouvoir se dire : « Le champ « qui fait subsister mes enfants est une telle portion du globe. Je suis, dans cette « proportion, co-propriétaire du monde. »

Expliquant les difficultés qu'il a fallu vaincre pour mesurer un arc de ce méridien qui servait de base aux nouvelles unités, l'orateur s'écrie : « Les citoyens Méchain et Delambre ont été chargés de ce travail. Surmontant une quantité d'obstacles physiques et moraux, ils s'en sont acquittés avec un degré de perfection dont on n'avait pas eu d'idée jusqu'à ce jour ».

« Le citoyen Delambre a étendu ses observations sur plus de six degrés depuis Dunkerque jusqu'à Rhodès... Le citoyen Méchain a observé depuis Rhodès jusqu'à Barcelone : il n'y a pas eu pour lui de Pyrénées. »

Enfin, l'orateur explique que les nouvelles unités sont réellement indestructibles, grâce à leur lien avec la dimension de la terre, et au soin que l'on a eu de leur comparer exactement la longueur du pendule battant la seconde :

« Nous possédons à présent et le mètre de la nature pour la mesure de la nature, et le kilogramme vrai qui en résulte. Après vous les avoir présentés, l'Institut va en déposer les prototypes dans les Archives nationales ; ils y seront conservés avec un soin religieux. Jamais l'ignorance et la férocité des peuples barbares ne les enlèveront à la vaillance, au patriotisme, aux vertus d'une nation éclairée sur ses intérêts, sur son honneur, sur ses droits.

« Mais si un tremblement de terre engloutissait, s'il était possible qu'un affreux coup de foudre mît en fusion le métal conservateur de cette mesure, il n'en résulterait pas, citoyens législateurs, que le fruit de tant de travaux, que le type général des mesures pût être perdu pour la gloire nationale, ni pour l'utilité publique. »

Ici, l'auteur de ce discours exagère un peu. Ni la mesure du méridien terrestre, ni la détermination de la longueur du pendule, n'auraient permis de reconstituer, en cas de perte, la longueur du mètre avec une parfaite exactitude. L'une et l'autre de ces mesures sont trop difficiles pour donner la précision que l'on recherche dans l'établissement de l'unité fondamentale. La définition même du mètre en partant du méridien terrestre n'était qu'une définition d'apparat, et Laplace le savait bien, mais sans cette très heureuse idée, qui

donnait en apparence au mètre un point de départ vraiment international, jamais cette unité n'aurait pu être adoptée par le plus grand nombre des nations civilisées. Quant à l'indestructibilité des nouvelles unités, on peut dire que l'on avait fait tout ce qu'il était humainement possible de faire pour l'obtenir, mais qu'aucun des phénomènes naturels alors connus n'était capable, à lui seul, de l'assurer. Ce n'est qu'à la fin du dix-neuvième siècle qu'un phénomène assez régulier pour assurer ce résultat a été découvert dans les vibrations lumineuses et a permis d'envisager sans crainte la perspective, d'ailleurs absolument invraisemblable, de l'anéantissement du mètre prototype et de toutes ses copies authentiques.

DIFFUSION DU SYSTÈME MÉTRIQUE Le système métrique était fondé. Il allait peu à peu se répandre en France et y faire disparaître la diversité des anciennes mesures, puis conquérir dans le monde entier les milieux scientifiques, enfin devenir le système d'unités de tous les peuples, à l'exception des peuples anglo-saxons. Nous aurons à raconter plus loin comment, dans la seconde moitié du dix-neuvième siècle, le système métrique, sans rien abandonner des éléments qui avaient fait sa force, reçut les quelques perfectionnements nécessaires pour le mettre en harmonie avec les progrès modernes de la métrologie. Pour le moment, jetons un coup d'œil rapide sur les premières années de son existence.

C'était une étrange illusion de croire que l'on pourrait, en quelques mois ou même en quelques années, opérer d'une manière complète une réforme aussi profonde, à laquelle toute la nation devait concourir. Ainsi qu'on aurait pu le prévoir, les progrès furent d'abord très lents. D'ailleurs, les mesures administratives ne furent pas toujours heureuses, et quelques-unes faillirent faire échouer la belle œuvre de nos savants.

Une loi du 19 frimaire an VIII (10 décembre 1799) sanctionna les nouveaux étalons. Moins d'un an après (13 brumaire an IX), un arrêté des Consuls apportait au nouveau système des modifications très fâcheuses. A côté de la nomenclature systématique que nous connaissons, cet arrêté autorisait l'emploi de dénominations plus simples, dont plusieurs n'étaient autres que les noms des anciennes unités, appliqués dans un tout autre sens que leur signification traditionnelle. C'est ainsi que l'hectogramme pouvait aussi être appelé *once*, désignation ancienne d'une unité de poids qui valait non pas cent grammes, mais environ trente grammes. On était autorisé à remplacer le mot kilogramme par le mot *livre* qui, dans le langage courant, en désignait environ la moitié. Si l'on avait voulu augmenter la confusion résultant de la diversité des anciennes mesures, il eût été difficile de mieux faire.

Encore ce décret respectait-il le principe de la division décimale ; mais dans l'administration consulaire et plus tard impériale, quelques personnes semblent avoir voulu renoncer même à cette base fondamentale de la réforme, et revenir à un système compliqué et dénué de toute valeur systématique. Laplace fit tous ses efforts pour sauvegarder l'œuvre qui était en partie la sienne. Le 3 février 1804, il écrivait à son ami Chaptal, ministre de l'Intérieur :

« Je vous envoie quelques observations sur les changements dans le système des poids et mesures dont vous m'avez parlé dernièrement aux Tuileries.

« Vous m'avez affligé en m'apprenant que vous les aviez proposés aux Consuls. J'aurais désiré que vous en eussiez conféré avec moi, ainsi qu'avec Berthollet, Delambre et quelques autres de nos amis, qui se sont particulièrement occupés de cet objet. Je ne verrais pas sans douleur notre beau système métrique altéré dans sa partie la plus essentielle. A la nomenclature près qui, comme vous le savez, ne fut pas notre ouvrage, je le crois le plus parfait que l'on puisse imaginer. On a dû s'attendre aux difficultés qu'il éprouve, mais je vous engage, au nom de l'amitié qui nous lie, à ne point vous laisser rebuter par elles et à prendre les mesures que votre bon esprit vous suggérera pour les surmonter. Le temps achèvera de les faire disparaître, et la génération future vous saura gré de vos efforts et de votre constance. »

Cela n'empêcha pas l'Empereur de signer, en 1812, un décret qui, s'il eût été appliqué, aurait anéanti l'œuvre des fondateurs du système métrique.

Ce n'est qu'en 1837, sous le ministère de Guizot et sur la proposition du ministre du Commerce Martin (du Nord) qu'une loi vint abroger le décret de l'Empereur et rendre obligatoire le système métrique pur. Le projet fut rapporté à la Chambre des Députés par l'astronome Mathieu, alors député de Saône-et-Loire, et à la Chambre des Pairs par Laplace, devenu marquis sous la royauté après avoir été comte sous l'Empire. La discussion fut assez vive, certains orateurs prétendant que l'emploi du système métrique était déjà universel en France, d'autres que l'on n'arriverait pas à déraciner les vieilles habitudes et qu'il était inutile de l'essayer. La loi fut finalement votée, et promulguée le 4 juillet 1837. Le décret de 1812 est abrogé ; l'emploi de poids et mesures autres que ceux du système métrique est interdit à dater du 1^{er} janvier 1840, ainsi que l'usage des anciennes dénominations dans tous les actes publics ou privés. La loi fut réellement appliquée, sans la moindre résistance, ce qui paraît donner raison à ceux qui affirmaient que le système métrique avait déjà remplacé, en grande partie, les anciennes mesures. Son domaine n'a pas cessé de s'étendre et l'on peut entrevoir le moment où il s'étendra sur le monde entier.

III

LA CHALEUR ET LES PROPRIÉTÉS DES FLUIDES

TEMPÉRATURE ET
QUANTITÉ DE CHALEUR

Voici une catégorie de phénomènes qui peuvent compter parmi les plus anciennement connus et que les premiers expérimentateurs avaient pris comme sujet de leurs recherches ; le thermomètre était l'un des plus anciens parmi les instruments de mesure, et à la fin du dix-huitième siècle, les grands faits, d'ailleurs assez simples, étaient à peu près tous connus. Et cependant nous restons encore, à cette époque, en ce qui concerne l'étude de la chaleur, dans une période de tâtonnements, où nous trouvons un mélange curieux d'aperçus géniaux et d'erreurs, de recherches expérimentales habiles et d'incompréhension singulière de certains grands phénomènes. Malgré l'œuvre admirable de Fourier, malgré les magnifiques aperçus de Laplace, cette époque reste une période de préparation ; elle ne trouvera sa véritable conclusion qu'avec la fondation de la thermodynamique, qui ne sera définitive qu'au milieu du dix-neuvième siècle.

Dans l'ensemble des phénomènes calorifiques, les physiciens modernes distinguent immédiatement deux notions fondamentales, celle de *température* et celle de *quantité de chaleur*. Une chaudière pleine d'eau bouillante et une goutte de la même eau sont à la même *température* ; pour les amener à cet état il a fallu des *quantités de chaleur* très inégales ; quelle que soit cette quantité de chaleur, elle ne permet pas de fondre un grain de plomb. Le thermomètre, qui était entre toutes les mains, mesurait les températures ; il est curieux que la notion de quantité de chaleur se soit introduite pour ainsi dire d'elle-même, et que l'on ait appris à mesurer cette quantité bien avant qu'elle ait été clairement définie. On fait remonter ces premières mesures au physicien écossais, Joseph Black, dont les recherches sur la chaleur s'étendent de 1757 à 1763. Son langage est, comme celui de presque tous ses contemporains, emprunté à l'idée de la matérialité du *calorique*, mais ce mystérieux *fluide* peut produire des effets très divers. Black dit que, parfois, le calorique devient *latent*, ce qui signifie qu'il ne produit pas de changement de température. Les mesures faites par Black sur les quantités de chaleur ainsi cachées sont déjà d'une remarquable précision.

CALORIMÉTRIE. LAVOISIER ET LAPLACE

En France, c'est à deux de nos deux plus grands hommes de science, Lavoisier et Laplace, que sont dues les premières mesures de quantités de chaleur ; ils retrouvent, dans leur *Mémoire* de 1780, les résultats de Black qu'ils ne connaissaient certainement pas, et donnent pour la première fois des données numériques sur ce que nous appelons les *chaleurs spécifiques* des corps et sur les quantités de chaleur dégagées dans les diverses réactions chimiques ; leur travail contient en germe la thermo-chimie. La collaboration d'un des premiers mathématiciens de son temps et du fondateur de la chimie en tant que science ne pouvait que produire un travail de grand intérêt.

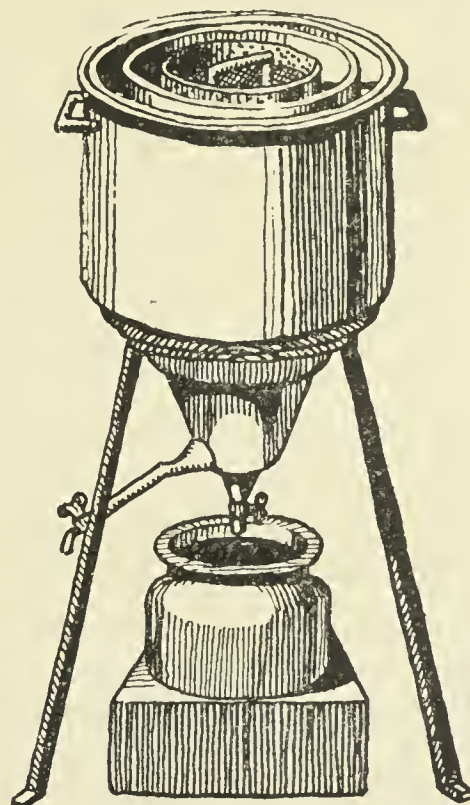
Lavoisier, qui appartient surtout à l'histoire de la chimie, mérite cependant une place importante dans celle de la physique. L'avènement de la chimie comme science était, pour la physique, une condition indispensable de progrès, et nous avons déjà insisté plusieurs fois sur les entraves qu'apportait à toute la science de la nature l'étrange imperfection dans laquelle se trouvaient les connaissances sur la nature des corps et leurs éléments constituants. Il suffit de comparer les ouvrages de physique écrits en France vers 1760 avec ceux de 1785 pour apercevoir l'étendue du changement. En dehors de ce service indirect, Lavoisier compte dans l'histoire de la physique par les progrès importants qu'il apporte dans la précision des mesures, en particulier par l'usage, de plus en plus exact, qu'il fait de la balance.

Quant à Laplace, il est avant tout mathématicien, bien que son influence ait été considérable sur la physique de son temps. Habitué surtout à soumettre au calcul les mouvements des astres, il ne cessa d'appliquer les mêmes méthodes à l'étude de tous les phénomènes naturels. La méthode newtonienne était, pour lui, le dernier terme du progrès scientifique, et c'est à cette forme unique qu'il voulait tout ramener. Son excursion sur le domaine de l'expérience fut de courte durée ; dans une lettre à Lagrange, écrite en 1783, il s'excuse presque de s'y être aventuré : « Je ne sais en vérité comment je me suis laissé entraîner à travailler sur la physique, et vous trouverez peut-être que j'aurais beaucoup mieux fait de m'en abstenir ; mais je n'ai pu me refuser aux instances de mon confrère, M. de Lavoisier, qui met dans ce travail commun toute la complaisance et toute la sagacité que je puis désirer. D'ailleurs, comme il est fort riche, il n'épargne rien pour donner aux expériences la précision qui est indispensable dans des recherches aussi délicates ».

Le fruit de cette collaboration fut le *Mémoire sur la chaleur* publié dans les *Mémoires de l'Académie des sciences* ; le volume est daté de 1780 bien qu'il n'ait réellement paru qu'en 1784. Les quantités de chaleur (le mot n'y est pas encore, mais c'est bien de cela qu'il est question) sont mesurées sans se servir du thermo-

mètre, par l'évaluation de la quantité de glace fondue ; c'est une des méthodes qu'avait employées Black, que les savants français retrouvent sous une forme un peu différente. Au moyen de ce « calorimètre à glace » ils font un grand nombre de mesures de quantités de chaleur ; les unes sont relatives à des phénomènes purement physiques et conduisent à la valeur de la « chaleur spécifique » (le nom apparaît ici pour la première fois) des divers corps ; d'autres se rapportent à des phénomènes chimiques ou biologiques. C'est là, du point de vue expérimental, la partie vraiment neuve de l'œuvre, qui est réellement le premier travail de thermo-chimie ; c'est là qu'est pour la première fois posé le problème de l'équilibre thermique des animaux. Les valeurs données sur la chaleur spécifique des corps, ramenées à nos unités actuelles, sont parfaitement concordantes avec celles que nous connaissons. Sur les chaleurs dégagées dans les réactions chimiques, les données sont également excellentes ; on trouve, par exemple, que la combustion d'une once de charbon permet de faire fondre six livres deux onces de glace ; rapporté à nos unités actuelles, cela correspond à un dégagement de chaleur de 7 840 calories par kilogramme de charbon brûlé, résultat parfaitement d'accord avec nos données actuelles.

Quant aux expériences sur la chaleur dégagée pendant la vie, leur importance est considérable. Elles sont faites sur un cochon d'Inde, que l'on introduit dans le calorimètre à glace, et consistent simplement à mesurer la quantité de glace fondue au bout d'un certain temps. On trouve, en moyenne, qu'en dix heures la chaleur dégagée par l'animal est suffisante pour fondre environ treize onces de glace. Les auteurs comparent ce dégagement de chaleur avec celui qui aurait été produit par les réactions chimiques effectuées dans la respiration, et c'est ici qu'apparaît l'importance des nouvelles découvertes sur les gaz et la nature de la combustion ; « l'air pur » (oxygène) qui pénètre dans les poumons se transforme partiellement en « air fixe » (gaz carbonique) en se combinant à quelque chose qui est emprunté au sang (Lavoisier ne veut pas encore faire état de ce qu'il soupçonne déjà sur la véritable composition



CALORIMÈTRE DE LAVOISIER ET LAPLACE. (D'après leur *Mémoire sur la chaleur*, 1780).

du gaz carbonique). Les auteurs évaluent d'autre part la quantité d'air fixe que dégage le cochon d'Inde en dix heures et trouvent que la production directe de ce gaz aurait dégagé sensiblement la quantité de chaleur qu'a produite la vie de l'animal. La cause de la chaleur vitale est donc bien dans la transformation chimique qui se produit dans le corps, et non le résultat de quelque action mystérieuse de la vie. La conclusion mérite d'être citée en entier : « Lorsqu'un animal est dans un état permanent et tranquille ; lorsqu'il peut vivre pendant un temps considérable, sans souffrir, dans le milieu qui l'environne ; en général, lorsque les circonstances dans lesquelles il se trouve n'atèrent point sensiblement son sang et ses humeurs, de sorte qu'après plusieurs heures le système animal n'éprouve point de variation sensible ; la conservation de la chaleur est due, au moins en grande partie, à la chaleur que produit la combinaison de l'air pur respiré par les animaux avec la base de l'air fixe que le sang lui fournit. »

NATURE DE LA CHALEUR : En dehors de ces résultats d'expérience
CALORIQUE OU MOUVEMENT incontestables, le Mémoire contient des considérations théoriques sur la nature de la chaleur, qui méritent qu'on s'y arrête. Il semble que l'on y reconnaisse séparément les tendances des deux auteurs, tendances contradictoires qui conduisent à deux théories inconciliables qui sont successivement exposées comme si les deux auteurs n'avaient pu se mettre d'accord. Lavoisier, avec tous les chimistes de son temps, devait pencher pour la théorie du *calorique*, fluide matériel impondérable ; Laplace, nourri de théories mécaniques, avait certainement eu l'idée de la chaleur mode de mouvement. Il semble, à lire les passages du Mémoire relatifs aux théories, que l'on assiste à une discussion courtoise entre les deux collaborateurs. Le passage suivant mérite d'être cité :

« Les physiciens sont partagés sur la nature de la chaleur. Plusieurs d'entre eux la regardent comme un fluide répandu dans toute la nature, et dont les corps sont plus ou moins pénétrés, à raison de leur température et de leur disposition particulière à les retenir ; il peut se combiner avec eux, et, dans cet état, il cesse d'agir sur le thermomètre et de se communiquer d'un corps à l'autre...

« D'autres physiciens pensent que la chaleur n'est que le résultat des mouvements insensibles des molécules de la matière. On sait que les corps, même les plus denses, sont remplis d'un grand nombre de pores ou de petits vides, dont le volume peut surpasser considérablement celui de la matière qu'ils renferment ; ces espaces vides laissent à leurs parties insensibles la liberté d'osciller dans tous les sens, et il est naturel de penser que ces parties sont dans une agitation continuelle

qui, si elle augmente jusqu'à un certain point, peut les désunir et décomposer les corps ; c'est ce mouvement intestin qui, suivant les physiciens dont nous parlons, constitue la chaleur.

« Pour développer cette hypothèse, nous ferons observer que, dans tous les mouvements dans lesquels il n'y a point de changement brusque, il existe une loi générale que les géomètres ont désignée sous le nom de *principe de la conservation des forces vives* ; cette loi consiste en ce que, dans un système de corps qui agissent les uns sur les autres d'une manière quelconque, la force vive, c'est-à-dire la somme des produits de chaque masse par le carré de sa vitesse, est constante... Dans l'hypothèse que nous examinons, la chaleur est la force vive qui résulte des mouvements insensibles des molécules d'un corps ; elle est la somme des produits de la masse de chaque molécule par le carré de sa vitesse.

« Si l'on met en contact deux corps dont la température soit différente..., la force vive du plus froid augmentera de la même quantité dont la force vive de l'autre diminuera...

« Nous ne déciderons point entre les deux hypothèses précédentes ; plusieurs phénomènes paraissent favorables à la dernière ; tel est, par exemple, celui de la chaleur que produit le frottement de deux corps solides ; mais il en est d'autres qui s'expliquent plus simplement dans la première ; peut-être ont-elles lieu toutes deux à la fois. »

On ne peut qu'admirer la précision avec laquelle Laplace posait ici les premiers principes de ce que l'on a appelé depuis la théorie mécanique de la chaleur. Contre la théorie du « calorique », l'argument qu'il donne aurait dû paraître sans réplique : peut-on attribuer une existence matérielle à un « fluide » que l'on peut créer en quantité illimitée par le simple frottement de deux corps ? Et après un tel argument, comment conclure par : « Nous ne déciderons point entre les deux hypothèses ? » L'idée de Laplace était probablement trop hardie pour recevoir l'assentiment général ; elle était d'ailleurs énoncée d'une manière magistrale, mais sans entrer dans le détail ; c'était une œuvre de longue haleine que d'en tirer toutes ses conséquences, et sur certains points cette œuvre n'est pas encore terminée, particulièrement en ce qui concerne la théorie cinétique des corps solides. On allait continuer, pendant plus d'un demi-siècle, à fermer les yeux sur le dégagement de chaleur par frottement, que Laplace avait cité comme un phénomène connu de tous. Laplace lui-même devait, dans sa longue carrière, rencontrer d'autres exemples du lien entre les phénomènes calorifiques et la mécanique ; le calcul de la vitesse du son est le plus connu, et il fut l'occasion de mesures dont l'influence ultérieure fut grande.

De cette longue suite de travaux épars, devait sortir enfin la thermodynamique moderne.

La collaboration du grand mathématicien et du grand chimiste ne cessa pas avec ce travail. Ils continuèrent à expérimenter sur la chaleur et, dans des recherches qui ne furent publiées que bien après la mort tragique de Lavoisier, déterminèrent d'excellentes valeurs des dilatations des métaux. Ces données, complétées un peu plus tard par celles de Borda, étaient nécessaires pour les progrès de la métrologie alors naissante ; on allait avoir à s'en servir dans les mesures de toutes sortes qui devaient précéder la fondation du système métrique.

LES PROPRIÉTÉS DES GAZ Il restait beaucoup à faire, à la fin du dix-huitième siècle, pour arriver à une connaissance précise des propriétés des gaz. Il y avait peu de temps que l'on avait appris à les distinguer les uns des autres et à les manier sans les perdre ; encore, l'art de les obtenir à l'état de pureté était-il bien loin de la perfection. En particulier, l'influence de la vapeur d'eau était mal connue, et beaucoup de désaccords entre les expérimentateurs tenaient à ce qu'aucune précaution n'était prise pour éliminer l'influence de l'eau qui restait sur les parois des vases et se réduisait en vapeur par élévation de température. Volta paraît avoir, l'un des premiers, attiré l'attention des physiciens sur cette cause d'erreur dans un travail publié en 1793 sur la dilatation que subit l'air quand on le chauffe. Malgré tout, au commencement du dix-neuvième siècle, les données sur les gaz étaient très mal connues ; on devinait leurs propriétés plutôt qu'on ne les connaissait par expériences directes. C'est alors que commença une belle série d'expériences, à laquelle prirent part la plupart des physiciens et des chimistes de cette époque, et qui devait aboutir aux lois si simples que les gaz suivent, au moins en première approximation. En 1806, Biot et Arago, à peine revenus d'une expédition scientifique que les circonstances avaient failli rendre dramatique, font les premières mesures précises sur la densité de l'air et des divers gaz. Malgré l'imperfection des moyens employés (l'art de faire le vide dans un récipient était encore dans l'enfance), les résultats obtenus sont d'une remarquable précision.

Peu d'années après, commencent les belles recherches de Gay-Lussac, qui allait retrouver avec plus de précision les résultats annoncés par le physicien anglais Dalton. Né en 1778, Gay-Lussac avait achevé ses premières études au milieu des terribles épreuves de la Révolution ; son père l'avait mis en pension à Paris, mais l'établissement privé où il était dut bientôt fermer ses portes, faute de pouvoir nourrir ses élèves. Mis dans une autre pension, il dut contribuer lui-même à pour-

voir à l'entretien de ses maîtres. Il fut cependant reçu à l'École polytechnique en 1797, et ne cessa pas, à des titres divers, de rester attaché à cette école. En 1800, Berthollet, à son retour d'Égypte, demanda un jeune polytechnicien pour l'aider dans ses expériences, et Gay-Lussac fut choisi ; toute sa vie devait être consacrée à la recherche scientifique. Il allait bientôt devenir répétiteur à l'École polytechnique, puis, en 1809, professeur de chimie en remplacement de son maître Berthollet ; il conserva cette chaire jusqu'en 1840. Il occupait en même temps une chaire de physique à la Faculté des sciences depuis sa fondation, et plus tard une chaire au Muséum. Son enseignement, clair et bien ordonné, était partout hautement apprécié.

Nous n'avons pas à exposer ici l'œuvre de Gay-Lussac dans le domaine de la chimie pure, et cette œuvre est de premier ordre. Nous devons nous borner à considérer ses découvertes dans le domaine des propriétés des gaz, qui ont fait de lui, avec son contemporain anglais Dalton, l'un des fondateurs de la science que l'on appelle aujourd'hui la physico-chimie. Dès 1806 il commence l'étude des propriétés physiques des gaz, et du premier coup, il arrive à cette grande loi de la nature : tous les gaz se dilatent de la même manière sous l'action de la chaleur. Il a fallu, plus tard, faire à cet énoncé de légères corrections ; il était très important de savoir qu'entre des gaz dont les propriétés sont extrêmement différentes il existe, à ce point de vue, une identité presque complète. La valeur numérique du coefficient de dilatation donnée par Gay-Lussac est trop élevée d'environ 3 pour 100 de sa valeur ; elle était beaucoup plus exacte que les valeurs antérieurement obtenues.

Ce sont ensuite les lois des combinaisons des gaz qu'examine Gay-Lussac. En 1808, il arrive aux célèbres lois qui régissent ces combinaisons : il existe toujours un rapport très simple entre les volumes de gaz qui entrent en combinaison et avec le volume du composé produit.

THÉORIE MOLÉCULAIRE DES GAZ

Cette loi si simple allait avoir, presque immédiatement, des conséquences importantes pour le développement de la théorie moléculaire des gaz. L'idée de la constitution moléculaire de la matière est aussi ancienne que la science humaine, mais ce n'était que récemment qu'elle avait pris quelque précision. En ce qui concerne les gaz, Bernoulli avait déjà développé les premiers principes de la théorie cinétique, qui attribue la pression d'un gaz au choc des molécules, en état d'agitation d'autant plus rapide que la température est plus élevée, sur les parois du vase qui le contient. Dalton avait récemment attiré l'attention sur la théorie atomique en se plaçant surtout au point de vue des lois de la chimie et en prenant comme guide les lois des combinaisons

en poids. Deux ans seulement après la publication du Mémoire de Gay-Lussac dans les Mémoires de la société d'Arcueil, l'Italien Avogadro, déjà connu par de bons travaux sur l'électricité, publie un important mémoire sur l'interprétation des lois de Gay-Lussac dans la théorie moléculaire des gaz. Son travail, publié en français dans le *Journal de physique*, a pour titre : « Essai d'une manière de déterminer les masses relatives des molécules élémentaires des corps, et les proportions selon lesquelles elles entrent dans les combinaisons. » Il montre que les lois de Gay-Lussac s'interprètent immédiatement en admettant que dans un même volume d'un gaz quelconque il y a toujours le même nombre de molécules. Il en déduit les poids moléculaires des divers corps gazeux, et montre que les indications données par Dalton étaient souvent inexactes. Ces vues ont été universellement admises, et sont considérées comme une des bases de la physico-chimie des gaz ; c'est avec justice que l'on a donné le nom de « nombre d'Avogadro » à ce nombre constant de molécules existant dans l'unité de volume de n'importe quel gaz. Ce nombre, il était impossible d'en assigner la valeur à l'époque dont nous parlons ; ce n'est que trois quarts de siècle plus tard, dans la période de l'atomisme moderne où la molécule isolée révèle ses secrets, qu'il a été possible de le déterminer.

Un peu plus tard, en 1814, la même idée fut reprise par Ampère qui, sans connaître le travail d'Avogadro, arriva exactement au même énoncé. Son mémoire parut dans les *Annales de chimie* ; dans une note ajoutée au moment de l'impression, Ampère reconnaît l'antériorité du savant italien. Le mémoire d'Ampère, écrit avec la clarté qui caractérisait toutes ses productions, ne contribua pas peu à attirer l'attention sur la découverte d'Avogadro.

A partir de ce moment, les recherches expérimentales sur les corps à l'état gazeux allaient avoir une base solide et un but défini ; la mesure de la densité d'un gaz donnait une indication précieuse sur son état moléculaire. Une longue série de recherches allait commencer, entraînant le perfectionnement progressif de la technique et une précision de plus en plus grande des résultats. Gay-Lussac lui-même ouvre cette série de mesures par ses déterminations de densités de vapeurs (1811). Citons seulement ici, sans trop empiéter sur la période suivante, les recherches sur le même sujet du chimiste Dumas (1826) et plus tard la longue et magnifique série d'expériences de Regnault.

CAPACITÉ CALORIFIQUE DES ATOMES

Presque de la même époque que celles de Gay-Lussac datent plusieurs autres recherches sur les propriétés thermiques des corps, très importantes soit par les résultats obtenus, soit

par les progrès dans la technique des mesures dont elles étaient l'occasion. De 1818 à 1820, Dulong et Petit publièrent leurs recherches sur les dilatations, où ils donnaient de nouvelles méthodes pour mesurer la dilatation du mercure sans faire intervenir celle du vase qui le contient, et pour mesurer les températures. En même temps, reprenant par de nouvelles méthodes les mesures de chaleurs spécifiques, ils faisaient des déterminations exactes sur tous les corps simples alors connus et arrivaient à cette loi célèbre : « Le produit de la chaleur spécifique par le poids atomique est le même pour tous les corps simples » ; il en résulte que la capacité calorifique est la même pour tous les atomes. Bien que seulement approchée, cette loi a eu une grande influence sur la consolidation de la théorie atomique. Le problème, beaucoup plus difficile, de la mesure des chaleurs spécifiques des gaz avait été déjà résolu en 1813 par Delaroche et Bérard (ce dernier, préparateur de Berthollet et plus tard professeur à la Faculté des sciences de Montpellier) qui avaient trouvé des résultats fort exacts. Le rapport des deux chaleurs spécifiques d'un même gaz avait déjà été introduit par Poisson ; le problème expérimental fut abordé par Gay-Lussac et finalement résolu par Clément et Desormes en 1819. Nous verrons quel rôle cette constante a joué, à propos de la vitesse du son, dans la fondation de la thermodynamique.

Une autre nécessité allait inviter les physiciens à étudier les mêmes questions. La machine à vapeur commençait à prendre une grande importance à la suite des perfectionnements dus à Watt ; le moment allait venir où cet appareil révolutionnerait toutes les conditions de la vie humaine dans les pays civilisés. Les ingénieurs ne pouvaient plus rester indifférents à son perfectionnement, et beaucoup se mirent à réfléchir sur ce que l'on appelait encore les « machines à feu » ; il en résulta un très important mouvement d'idées et une longue série d'expériences destinées à fournir les données numériques, qui manquaient encore, sur les propriétés des vapeurs. C'est à la fin de la période que nous étudions que commence ce mouvement, avec les expériences de Dulong et Arago (1825) et avec les méditations isolées de Sadi Carnot (1824). Ce mouvement d'idées devait avoir son développement dans la période suivante.

Quant aux lois de l'équilibre des liquides, les principes en étaient posés depuis longtemps, et l'étude de l'équilibre des grandes masses fluides soumises à l'attraction de leurs parties était un problème purement mathématique. Sur un point cependant, il restait à préciser certaines propriétés physiques. On connaissait, depuis le dix-septième siècle, la curieuse ascension des liquides dans les tubes fins, et ces *phénomènes capillaires* avaient donné lieu à d'assez nombreuses expériences, mal

reliées entre elles. Clairaut, dans son *Traité de la figure de la terre* (1743), donne un aperçu des forces qui peuvent produire cette ascension. Laplace, comme supplément à sa *Mécanique céleste*, publia en 1807 un premier essai d'une théorie mathématique, construite sur le type newtonien en analysant les actions qu'exercent les molécules liquides les unes sur les autres ; plusieurs des lois fondamentales de la capillarité, en particulier celle qui régit l'influence de la forme de la surface libre du liquide, y sont définitivement indiquées. Le point de départ de la théorie de Laplace donna lieu à de nombreuses discussions ; entre 1820 et 1850, les plus illustres géomètres, Gauss, Poisson, J. Bertrand, en présentèrent autrement les principes, mais de ces discussions les résultats découverts par Laplace, et confirmés par les expériences de Gay-Lussac, sortirent inattaquables.

**L A PROPAGATION DE LA
CHALEUR. FOURIER**

Voici encore un phénomène dont la connaissance est aussi vieille que l'espèce humaine, et qui, il y a un peu plus d'un siècle, n'avait donné lieu qu'à des recherches sans importance ; ce phénomène, soumis aux réflexions d'un mathématicien de génie, allait être l'occasion de l'éclosion d'une nouvelle branche de la physique mathématique.

On savait de tout temps que lorsque l'on chauffe l'extrémité d'une tige de métal, l'autre extrémité s'échauffe peu à peu ; il y avait propagation de la chaleur dans le métal. L'expérience la plus vulgaire montre que les divers corps possèdent cette conductibilité à des degrés très inégaux, et l'on avait déjà pu classer les métaux par ordre de conductibilité décroissante, sans pour cela sortir de la période qualitative. C'est alors que le mathématicien Fourier, sans aucune expérience nouvelle, en prenant comme point de départ des postulats presque évidents, fait une science nouvelle de ce petit fait particulier.

C'est un beau type à la fois de savant et d'homme d'action que ce mathématicien qui a été en même temps habile administrateur, bon diplomate, excellent professeur, orateur, écrivain. Il naquit en 1768 à Auxerre, où son père exerçait le métier de tailleur. Recommandé par hasard à l'évêque d'Auxerre, il fit de brillantes études littéraires chez les bénédictins, puis fut initié aux éléments des mathématiques, qui soulevèrent en lui un véritable enthousiasme. Il avait pris lui-même l'habit de bénédictin, mais n'avait pas encore prononcé ses vœux lorsque les événements de 1789 vinrent bouleverser son existence. Il renonça à la carrière ecclésiastique, embrassa avec ardeur les idées nouvelles, et se mêla à la vie politique de sa petite ville, cherchant toujours à orienter l'opinion publique vers les solutions raisonnables. Bientôt, la Convention décide de réorganiser l'enseignement, et crée à Paris l'éphé-

mère École normale destinée à fournir des maîtres à toutes les écoles du pays. Fourier est l'un des quinze cents jeunes gens qui viennent suivre les leçons des plus illustres savants de leur temps. Il y est bientôt remarqué, et est désigné comme l'un des « maîtres de conférences » chargés de commenter pour les élèves moins bien doués les leçons parfois trop difficiles des professeurs. Fourier garda toute sa vie un souvenir ineffaçable de cette année d'études, qui le mit en rapports avec les grands noms de la Science française.

L'École polytechnique est bientôt fondée ; Fourier y enseigne la mécanique, avec Lagrange comme collègue. Un nouvel événement politique allait le rejeter dans la vie active. L'aventureuse expédition d'Égypte est décidée ; Bonaparte charge Monge et Berthollet de recruter un groupe de savants qui doivent l'accompagner. Fourier fut l'un des premiers à accepter, et joua dans l'expédition un rôle de premier plan, à la fois scientifique, diplomatique et administratif. Dès l'arrivée, il est élu « secrétaire perpétuel » de cet Institut d'Égypte qui devait vivre deux ans ; il est désigné comme commissaire français auprès du Divan du Caire, et trouve le temps de s'occuper d'archéologie, de travaux publics et de mathématiques. Il ne quitte l'Égypte qu'avec les derniers débris de l'armée. De retour en France, il fait décider la publication d'un « ouvrage d'Égypte » dont il réunit les éléments. Très peu de temps après, le Premier Consul le nomme préfet de l'Isère, département où les dissensions politiques étaient ardentes. Il réussit à y ramener le calme, étudie lui-même les projets qui lui paraissent utiles au bien général, et réussit à faire aboutir quelques-uns des plus difficiles. Son œuvre la plus importante fut l'assèchement des marais de Bourgoin, qui eut pour effet d'assainir le territoire de trente-sept communes et de rendre à la culture d'immenses terrains. C'est pendant les douze années de cette intelligente administration que le préfet de l'Isère composa la plus grande partie de sa *Théorie mathématique de la chaleur*.

La seconde Restauration lui enleva ses fonctions et le laissa absolument sans ressources. Il fut heureusement recueilli par un de ses anciens élèves de l'École polytechnique, de Chabrol, alors préfet de la Seine, qui le fit nommer directeur du bureau de statistique du département qu'il administrait. Il devint bientôt membre de l'Académie des sciences, puis secrétaire perpétuel de cette Académie. Il mourut en 1830 après avoir mené, depuis la chute de l'Empire, une existence fort retirée, entièrement consacrée à l'étude de la science.

Sa « théorie de la chaleur » est, en réalité, uniquement consacrée à l'étude de la propagation de la chaleur, et principalement à ce que nous appelons aujourd'hui la propagation « par conductibilité ». Il ne semble pas que Fourier se soit jamais livré

lui-même à aucune expérience ; les principes de sa théorie, il les tire, pourrait-on dire, du simple sens commun ; un de ses grands mérites est, justement, d'avoir vu que les lois du phénomène si complexe qu'il veut étudier deviennent d'une simplicité extrême lorsqu'on réduit ce problème au cas élémentaire, où la transmission de la chaleur se fait à travers une couche infiniment mince de métal. Cette loi élémentaire il essaie bien de la justifier par des raisonnements du type newtonien, selon la mode de l'époque, mais on sent qu'il a deviné le résultat d'avance. Alors, les équations différentielles du problème peuvent être écrites presque immédiatement ; mais c'est à ce moment que la difficulté commence. Ces équations sont d'un type qui n'avait jamais été rencontré, et les méthodes alors classiques ne peuvent être d'aucun secours. Toute une nouvelle analyse est inventée pour résoudre ce nouveau problème, et sa portée dépasse infiniment le problème, en somme très spécial, qui était posé.

Les contemporains ne paraissent pas avoir eu une idée bien nette du progrès accompli par Fourier ; non pas que son œuvre ait été méconnue, mais elle a été mal appréciée. On a vu tout d'abord l'importance du problème particulier qui était résolu, on l'a exagérée même, en particulier dans l'École positiviste. Auguste Comte, non sans flatterie, allait jusqu'à dire que l'œuvre de Fourier constituait le début d'une quatrième science mathématique, la *thermologie*, qui se trouvait trop avancée pour être confondue avec le reste de la physique. La vérité était différente : il y avait bien une nouvelle science fondée, mais ce n'était pas la « thermologie », c'était la physique mathématique dont les travaux de Fourier constituaient l'un des premiers échelons. Tous les mathématiciens utilisent aujourd'hui les méthodes de Fourier ; pas un électricien s'occupant de courant alternatif, pas un acousticien étudiant les mouvements vibratoires, pas un météorologiste recherchant la cause des phénomènes qu'il étudie qui ne développe en « séries de Fourier » les fonctions périodiques qui se présentent dans leurs études.

Quant au but spécial que poursuivait Fourier, il fut complètement atteint, et ses recherches, dans ce domaine particulier, furent aussi le point de départ de nombreuses recherches expérimentales, dont quelques-unes ont eu une portée pratique considérable. Toute la technique moderne de l'isolement thermique, en vue de la protection contre le chaud ou contre le froid, a pour point de départ la théorie de Fourier. Sur certains points même il devance considérablement son temps ; quelques-uns de ses raisonnements sur les échanges de chaleur par rayonnement attendirent pendant cinquante ans les perfectionnements que, mieux armé, Kirchhoff devait y apporter.

IV

L'ÉLECTROSTATIQUE ET LE MAGNÉTISME

NÉCESSITÉ DE SORTIR DES EXPÉRIENCES QUALITATIVES Les principaux faits de l'électrostatique étaient connus vers le milieu du dix-huitième siècle, du moins d'une manière qualitative ; aucune donnée numérique, aucune loi quantitative, ne venaient fournir une base aux recherches mathématiques. Aussi voyons-nous, jusqu'à l'époque où nous allons parvenir, l'électricité rester un objet de curiosité plus que de science ; quelques grands mathématiciens s'y étaient intéressés, mais aucun n'avait pris l'étude des phénomènes électriques comme but de ses recherches. Il en était de même pour les propriétés des aimants, malgré l'intérêt pratique que la construction des boussoles donnait à cette branche de la physique. Les recherches de Coulomb allaient changer complètement cette situation et faire entrer enfin l'électrostatique dans le grand cadre des sciences physico-mathématiques. L'intérêt pratique de telles recherches ne pouvait pas apparaître à cette époque ; il n'en est que plus curieux de constater que la voie allait être ouverte par un homme occupé toute sa vie à la solution de problèmes pratiques, par un véritable ingénieur. Coulomb est, en effet, l'un des plus beaux types de nos ingénieurs savants, dominant leur art, toujours soucieux de le faire progresser, et ne laissant pas échapper une occasion d'entreprendre une recherche scientifique, même lorsqu'elle se trouve tout à fait en dehors de leurs occupations habituelles.

COULOMB INGÉNIEUR Né à Angoulême en 1736, d'une famille de magistrats, Charles-Augustin Coulomb entra dans le corps du génie militaire, et fut d'abord envoyé à la Martinique où on le chargea de construire le fort Bourbon. Après un séjour de trois ans, il revint en France très éprouvé par le climat des tropiques ; il fut envoyé successivement, pour diriger divers travaux, à l'île d'Aix, à Rochefort, à Cherbourg. Ses premiers ouvrages se rapportent à l'art de la construction, ou plutôt aux principes qui servent de base à cet art. En 1776, il publie un Mémoire sur la statique des voûtes. Pendant qu'il est à Rochefort en 1779, à propos de travaux dont il est chargé, il trouve l'occasion d'étudier le frottement des corps solides, phénomène qui joue un si grand rôle dans toute la mécanique

pratique, et sur lequel on n'avait presque aucune donnée. L'amiral de la Touche-Tréville, qui commandait alors à Rochefort, avait donné l'ordre de mettre à sa disposition tous les moyens nécessaires pour que Coulomb pût faire ses expériences. Avec des appareils très simples et très judicieusement combinés, celui-ci mesure le frottement dans un grand nombre de cas, choisis parmi ceux qui se présentent dans les machines usuelles, et il obtient une série de données qui sont restées classiques ; les quelques lois simples qu'il en déduit sont encore, en dépit des perfectionnements de la technique, souvent invoquées. Avec d'autres expériences sur la raideur des cordes, ces mesures constituent la base de sa « théorie des machines simples », développé dans un mémoire à l'Académie des sciences en 1779. A la même époque, il est désigné par le ministre de la Marine comme commissaire du roi aux États de Bretagne, pour apprécier la possibilité et les avantages d'un projet de canaux ; il montre dans cette délicate mission la fermeté de son caractère et la droiture de son jugement. Malgré les États, il soutient l'opinion qu'il vaut mieux ne pas exécuter le projet, qui conduirait à des dépenses hors de proportion avec l'utilité du résultat. A son retour, il est mis en détention à l'Abbaye sous ce prétexte que, désigné par le ministre de la Marine, il n'a pas consulté son chef direct, le ministre de la Guerre. Mandé une seconde fois en Bretagne, il soutient son opinion par des arguments si solides que son opinion prévaut et qu'il reçoit l'expression de la reconnaissance des États.

Ses avis faisaient également autorité en matière d'hydraulique. En 1784 il devient intendant des eaux et fontaines de France. En 1786, il reçoit la survivance de la place de conservateur des plans en relief. La même année, il est élu membre de l'Académie des sciences, dont il était déjà correspondant. Il avait le grade de lieutenant-colonel du génie.

Lorsque l'Assemblée nationale songe à la refonte des unités, il est un de ceux qui sont chargés des travaux nécessaires à cette réforme. Mais bientôt l'Académie est supprimée, et Prieur fait rayer Coulomb de la liste des membres de la Commission des poids et mesures. Coulomb quitte alors Paris, en même temps que son ami Borda, et se réfugie aux environs de Blois.

Il revint à Paris lorsque, sous le nom d'Institut de France, les Académies furent rétablies, et, dès sa fondation, il fit partie de la classe des sciences, mais il cessa de prendre une part active à l'administration de son pays. En 1802, lorsque Bonaparte essaya de réorganiser l'instruction publique, il appela aux fonctions d'Inspecteur général des études quelques-uns des hommes les plus éminents de son époque ; Coulomb fut l'un d'eux, et il s'acquitta de ses nouvelles fonctions

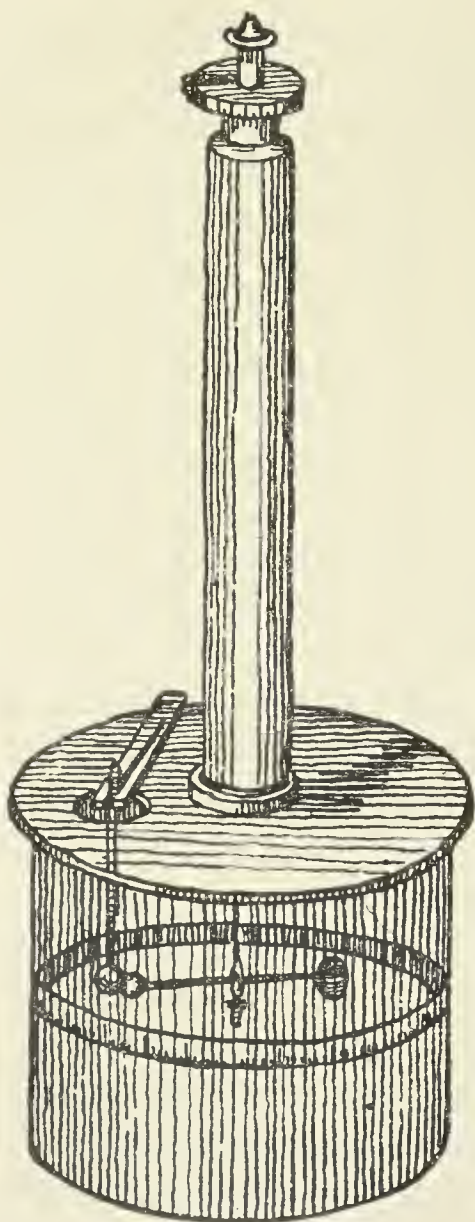
avec le zèle et l'exactitude qu'il portait partout. Il mourut la 23 août 1806 « ne laissant guère à son fils, dit Delambre, d'autre héritage qu'un nom respecté, l'exemple de ses vertus et le souvenir des services éclatants qu'il a rendus à la science ».

Comme on vient de le voir, la vie de Coulomb fut presque entièrement consacrée à des œuvres très éloignées de la pure spéculation ; c'était, avant tout, un ingénieur. Plusieurs de ses ouvrages sont d'un caractère exclusivement technique, témoin ses *Recherches sur les moyens d'exécuter sous l'eau toutes sortes de travaux hydrauliques sans expliquer aucun épuisement* et ses *Recherches sur les moulins à vent*. Une de ses grandes préoccupations était d'obtenir du travail humain le meilleur rendement, afin de diminuer la fatigue des travailleurs manuels. Dès 1775, il avait composé un mémoire, qui ne fut publié que vingt-cinq ans plus tard, où il évaluait « la quantité d'action que les hommes peuvent fournir par leur travail journalier suivant les différentes manières dont ils emploient leurs forces ». On sait quelle place des questions de ce genre tiennent dans les préoccupations des ingénieurs modernes, et avec quel soin elles ont été étudiées par l'école qui se réclame du « système Taylor ». Les adeptes de ce système pourraient revendiquer Coulomb comme l'un de leurs précurseurs ; leurs préoccupations étaient les siennes, ainsi que leurs méthodes, consistant à étudier dans tous ses détails l'influence de chacun des facteurs dont dépend le problème que l'on étudie. Aussi bien dans ses recherches d'ordre pratique que dans ses travaux scientifiques, c'est à cette méthode que Coulomb dut ses grands succès.

Il n'est pas surprenant de voir un tel homme surtout préoccupé de questions de mécanique, et en fait il doit être considéré comme l'un des fondateurs de ce que nous pouvons appeler la mécanique physique, science qui s'occupe non pas du mouvement de corps imaginaires doués de propriétés idéales mais bien du mouvement des corps réels, dans les conditions mêmes où nous les employons dans nos machines. Un de ses derniers mémoires (1801) est encore consacré à une étude de ce genre ; il a pour titre : *Expériences destinées à déterminer la cohérence des fluides et les lois de leur résistance dans les mouvements très lents*. La question traitée se rattache à celles qu'étudiaient les hydrauliciens, mais l'étude est faite ici d'une manière vraiment scientifique, dans un cas où les résultats, quoique particulièrement simples, n'avaient pas encore été obtenus. La propriété qu'étudie Coulomb est celle que nous désignons aujourd'hui sous le nom de « viscosité » des fluides, et rien n'est à changer aux méthodes qu'il emploie, ni aux résultats qu'il obtient.

COULOMB ET LA
BOUSSOLE

Ce ne sont cependant pas ces belles recherches qui ont illustré son nom ; Coulomb, fondateur de l'électrostatique, a trop fait oublier Coulomb fondateur de la mécanique expérimentale. C'est cependant



BALANCE DE COULOMB

une question ayant un immédiat intérêt pratique qui l'amena à s'occuper des propriétés des aimants. En 1779, l'Académie avait mis au concours le perfectionnement des boussoles. Coulomb envoie un mémoire ayant pour titre : *Recherches sur la meilleure manière de fabriquer les aiguilles aimantées* ; le prix fut partagé entre lui et le physicien hollandais Van Swinden, qui devait participer vingt ans plus tard comme délégué de la République batave à la fondation du système métrique. Comme il le fait toujours, Coulomb aborde la question d'une manière parfaitement méthodique, en s'occupant avant tout d'obtenir des données numériques précises qui serviront de base à toutes les conclusions pratiques. Il apprend, tout d'abord, à déterminer la qualité magnétique de chaque barreau (ce que nous appelons son « moment magnétique », ce que Coulomb appelle déjà le « momentum magnétique »). Il se sert d'abord de la méthode des oscillations, qui permet de juger de la grandeur des forces exercées par la rapidité plus ou moins grande des mouvements qu'elles produisent. Il examine ensuite les propriétés des divers fils que l'on peut employer pour suspendre le barreau, et, pour la première fois, étudie leur *torsion* ; il montre que les fils de soie, tels qu'ils sortent du cocon, ne donnent lieu qu'à une torsion tout à fait négligeable, et l'on sait quel emploi fréquent a été fait

de ces « fils sans torsion » dans la construction d'une foule d'appareils délicats. Enfin, utilisant toutes ces données, Coulomb indique la construction d'une boussole très précise destinée à mesurer les petites variations du magnétisme terrestre.

La torsion des fils s'était présentée incidemment ; ce sujet ne pouvait manquer d'intéresser le mécanicien qu'était Coulomb. Il étend ses expériences (elles ne

nécessitaient qu'un matériel très simple), les reprend méthodiquement sur des fils de longueurs diverses, de diverses sections et de différentes substances. La mesure précise, méthodiquement conduite et étendue à un grand nombre de cas, est toujours son grand moyen de découverte. Des lois simples et générales se dégagent de cet ensemble. Un mémoire écrit en 1784 résume tout ce grand travail ; il a pour titre : *Recherches théoriques et expérimentales sur la force de torsion et sur l'élasticité des fils de métal*.

Dès lors, l'idée devait lui venir de mesurer de très petites forces en les équilibrant par la « force de torsion » d'un fil, force qui était désormais connue ; celle de mesurer ainsi les très faibles actions électriques devait se présenter tout naturellement à son esprit. Le premier des *Mémoires sur l'électricité et le magnétisme*, publiés de 1785 à 1789 est, en effet, consacré à la description du merveilleux instrument de mesure suggéré par l'étude de la torsion des fils. Il a pour titre : *Construction et usage d'une balance électrique, fondée sur la propriété qu'ont les fils de métal d'avoir une force de torsion proportionnelle à l'angle de torsion*.

**L A LOI ÉLÉMENTAIRE EN
ÉLECTRO-STATIQUE**

Voici l'instrument créé, la balance de torsion ; le sujet principal peut être abordé avec fruit. Il va l'être toujours avec la même impeccable méthode, qui fait apercevoir à Coulomb l'élément simple de chaque question. Les effets des attractions et répulsions électriques devaient apparaître comme d'une très grande complication ; Coulomb s'attaque immédiatement au cas qui doit le conduire à la « loi élémentaire », celui où se trouvent en présence seulement deux corps électrisés, assez petits ou assez éloignés pour que l'on puisse traiter chacun d'eux comme un point. Soit au moyen de la balance de torsion, soit par la méthode des oscillations, il trouva que la loi d'attraction ou de répulsion est la loi newtonienne d'après laquelle la force est en raison inverse du carré de la distance. L'action réciproque de deux pôles d'aimant conduit à la même loi.

Les mémoires suivants semblent avoir été écrits justement pour servir de vérifications aux conséquences que les mathématiciens tireront de la loi d'attraction des particules électrisées. Il y est surtout question de la manière dont l'électricité se répartit à la surface des corps conducteurs, de la distribution de l'électricité entre deux conducteurs qui se touchent, de l'action qu'un corps électrisé exerce sur une particule placée dans son voisinage. Un soin extrême est apporté à démontrer les résultats les plus importants, dont quelques-uns sont encore classiques, par exemple le fait que l'électricité se porte uniquement à la surface des conducteurs et que sa distribution est complètement indépendante de la nature de ce conducteur.

Un des électromètres dont il se sert est d'une telle sensibilité qu'une force de $1/60\ 000^e$ de grain (moins que la millièame partie du poids de 1 milligramme) chasse l'aiguille à plus de 90 degrés.

A PPLICATION DES MATHÉMATIQUES
A L'ÉLECTRO-STATIQUE POISSON

Ce magnifique ensemble de recherches avait été exécuté en moins de quatre ans ; il est vrai qu'il était l'aboutissement de toute une existence consacrée à la recherche scientifique. Les contemporains manifestèrent la plus vive admiration, et devinèrent que la science de l'électricité venait d'entrer dans une voie nouvelle. Il nous semble, à la distance où nous sommes, que les développements mathématiques ne suivirent pas aussi rapidement qu'on aurait pu l'attendre. Puisque la loi des actions électriques était la loi newtonienne, on pouvait leur appliquer immédiatement les procédés de calcul que Laplace venait justement de développer dans son *Mémoire sur la théorie des attractions des sphéroïdes et la figure des planètes*, où apparaissait pour la première fois la « fonction potentielle » juste au moment où les physiciens allaient avoir à s'en servir. Peut-être la période révolutionnaire (les Mémoires de Coulomb sur l'électricité se terminent justement en 1789) retarda-t-elle un peu le développement de l'électrostatique mathématique.

C'est le meilleur élève de Laplace, le grand mathématicien Poisson, qui allait poser et résoudre les premiers problèmes de cette science. Son nom appartient surtout à l'histoire des mathématiques ; ses travaux ont eu cependant une telle influence sur les progrès de la physique que l'on ne peut se dispenser d'en parler ici.

D'une famille très modeste (son père avait fait, comme simple soldat, les guerres du Hanovre), Poisson naquit à Pithiviers en 1781. Il paraissait destiné, par sa naissance, à une existence très obscure ; il fut de ceux que l'École polytechnique, encore toute récente, fit sortir de la foule. C'est par le *Journal de l'Ecole polytechnique*, savant recueil qui tomba par hasard entre ses mains, que se révélèrent à lui-même ses aptitudes mathématiques, qu'il put heureusement développer à l'École centrale de Fontainebleau où le hasard lui donna d'excellents maîtres. En 1798, il fut reçu premier à l'École polytechnique, et fut immédiatement remarqué par ses professeurs, en particulier par l'illustre Lagrange, à qui il apportait fréquemment des démonstrations nouvelles des théorèmes démontrés au cours. L'École se l'attacha presque immédiatement après sa sortie ; en 1800, il obtint un poste de répétiteur, devint professeur suppléant en 1802, et fut nommé professeur en 1806 en remplacement de Fourier, que Napoléon avait nommé préfet du département de l'Isère. En 1809, lors de la création de la Faculté des sciences de Paris, il fut chargé d'y enseigner

la mécanique. Ses leçons étaient d'une clarté parfaite, et ses ouvrages didactiques sont un modèle de précision.

Ce n'est pas ici le lieu de dire quel a été son rôle dans le développement des mathématiques. Bien qu'il n'ait jamais expérimenté, son influence a été considérable sur le développement de la physique mathématique ; à ce point de vue, seul le grand Fourier peut lui être comparé.

C'est en 1811 qu'il commence à s'occuper du problème de l'équilibre de l'électricité sur les conducteurs. On peut résumer son œuvre en disant qu'il utilise comme point de départ les résultats expérimentaux de Coulomb et comme méthode mathématique celle qu'employait Laplace pour l'étude de l'équilibre des planètes ; mais les difficultés restaient grandes, et Poisson les résout avec une rare habileté. Les problèmes auxquels il s'attaque sont justement ceux que Coulomb a étudiés par l'expérience directe : équilibre de l'électricité sur un conducteur en forme d'ellipsoïde ; répartition de la charge électrique entre deux sphères qui se touchent. Les calculs sont poussés jusqu'à l'application numérique, et la comparaison avec les résultats trouvés par Coulomb donne un résultat pleinement satisfaisant, apportant ainsi une éclatante confirmation d'une théorie difficile.

La voie ainsi ouverte devait être brillamment suivie par une longue suite de géomètres éminents ; pendant plus de cinquante ans, il n'y eut presque pas un mathématicien ou un physicien géomètre qui ne fît quelque effort pour apporter des méthodes nouvelles en vue de la solution du problème posé par Poisson à la suite de Coulomb. En France, Cauchy, Lamé, en Allemagne, Gauss, en Angleterre, Green, plus tard Lord Kelvin apportèrent des idées nouvelles. La physique y gagna des méthodes de calcul plus complètes et plus variées ; les mathématiques y gagnèrent probablement encore plus, car bien des problèmes d'une portée philosophique considérable n'auraient peut-être jamais été posés si l'imagination de l'homme n'avait été aidée par les résultats de l'expérience.

V

LE COURANT ÉLECTRIQUE. L'ÉLECTRO-MAGNÉTISME

L E COURANT ÉLECTRIQUE DANS
L'ANCIENNE PHYSIQUE

L'électrostatique était enfin sortie de la phase descriptive pour devenir un sujet de recherches numériques et mathématiques ; les instruments de mesure de cette

science, avec la balance de Coulomb, avec l'électroscope à feuilles d'or, avec l'électromètre condensateur de Volta, avaient atteint une délicatesse qui n'a guère été dépassée. Il restait tout un grand domaine à découvrir et à explorer, et l'on devait y trouver la plus remarquable série de faits nouveaux en même temps que les plus brillantes applications. Je veux parler de l'ensemble des phénomènes produits par le courant électrique. L'exploration de ce nouveau domaine fut l'une des grandes œuvres de la première moitié du dix-neuvième siècle ; les applications ne vinrent que plus tard.

A vrai dire, les électriciens du dix-huitième siècle connaissaient déjà le courant électrique, et c'est aux propriétés du courant électrique que se rapportait une bonne partie des expériences qui intéressaient tant le public instruit de cette époque. On savait fondre un fil par la décharge d'une bouteille de Leyde, volatiliser une feuille mince de métal, produire une commotion dans les membres des personnes interposées entre les deux armatures. Dans le langage alors le plus en usage, on disait que ces phénomènes étaient dus au *conflit* des deux électricités au moment où elles se recombinaient. Malheureusement, l'étude détaillée de ces phénomènes était fort difficile, parce que le « courant électrique », comme nous disons aujourd'hui, ne durait qu'un temps pour ainsi dire infiniment petit, et qu'il est toujours fort difficile d'analyser quelque chose qui est terminé en un temps trop court pour être détaillé par nos sens. Aucun résultat définitif, aucune loi simple, ne pouvaient être obtenus tant que l'on n'aurait pas trouvé le moyen de rendre permanent le phénomène jusque-là fugitif et presque insaisissable.

L A PILE DE Ce fut la grande découverte de Volta qui allait donner cet
VOLTA indispensable instrument de recherche.

On a souvent insisté sur le rôle que joua le hasard dans la découverte de la pile qui fut, en effet, une conséquence lointaine de l'observation en partie fortuite faite par le physiologiste italien Galvani sur les contractions musculaires des grenouilles. Il est plus juste de dire que Volta était admirablement préparé par ses travaux antérieurs à la découverte qui a illustré son nom, et sans laquelle il n'en serait pas moins un des grands physiciens de son temps. Né à Côme en 1745, professeur de physique à l'École de cette ville dès 1774, puis à l'Université de Pavie en 1779, il fut, toute sa vie, en relations étroites et cordiales avec les physiciens français. Dès l'âge de dix-huit ans il est en correspondance avec l'abbé Nollet, et l'on peut supposer que les conseils de cet habile expérimentateur ne furent pas étrangers à sa vocation d'électricien. En 1780, nous le trouvons à Paris où, avec Lavoisier et Laplace, il

réussit à montrer la production d'électricité par l'évaporation de l'eau. Il attachait une grande importance à cette expérience, dans laquelle il pensait trouver l'explication de l'électricité atmosphérique, question qui préoccupait vivement les physiciens depuis les découvertes de Franklin. Le progrès capital que l'électrostatique dut à Volta fut l'introduction de la notion de *tension électrique*, distincte de la notion de *quantité d'électricité* qui joue le rôle le plus important dans les travaux de Coulomb. Il est vrai que la notion de tension ne prit sa signification mathématique que plus tard, avec les recherches théoriques de Poisson et de Green ; mais chez Volta elle a déjà un sens expérimental parfaitement précis. C'est cette notion qu'il introduit constamment dans ses recherches sur « l'électricité de contact » ; c'est cette quantité qu'il mesure au moyen de son admirable électroscope condensateur ; c'est elle enfin qui le conduit à l'invention de la pile.

Volta annonce pour la première fois cette découverte en mars 1800 par une lettre au président de la Société royale de Londres. Très peu de temps après, le Premier Consul l'invite à venir à Paris pour montrer ses expériences aux savants français. Pavie faisait alors partie de la République cisalpine (un peu plus tard de la République italienne) étroitement unie à la République française et Bonaparte tenait beaucoup à l'amitié du peuple qu'il avait émancipé. Il réserva à Volta la plus brillante réception et le fit inviter à répéter ses expériences devant la première classe de l'Institut (Académie des sciences). La séance eut lieu en brumaire an IX (novembre 1800). Bonaparte y assista et y prit un vif intérêt ; il aurait même, après avoir entendu Volta, suggéré quelques sujets de recherches qui témoignent de plus d'imagination que de connaissance du sujet. Il proposa immédiatement à l'Institut de décerner à Volta une médaille d'or destinée à consacrer l'admiration des savants français. Devenu empereur et roi d'Italie, Bonaparte ne cessa de combler Volta de prévenances et d'honneurs ; il exprima parfois le regret que la voie ouverte par le grand Italien n'ait pas été immédiatement suivie par un plus grand nombre de savants français.

PREMIÈRES ÉTUDES AVEC LA PILE

Le mouvement d'admiration et de curiosité soulevé par la découverte de Volta n'eut pas, en France, de conséquence immédiate. L'école physico-mathématique française était surtout orientée vers les théories mathématiques, et la pile de Volta ne donnait pas encore prise à d'importants développements mathématiques ; c'était surtout un merveilleux outil pour explorer la région encore inconnue de l'électrochimie. C'est en Angleterre que les conséquences de l'invention de la pile se firent surtout sentir. Volta avait insisté

sur l'identité entre les phénomènes produits par son appareil et ceux que l'on connaissait déjà ; l'année même où ce nouvel outil était mis entre les mains des chercheurs, Carlisle et Nicholson s'en servent pour décomposer l'eau. Les moyens dont on disposait n'étaient pas bien puissants, car, en prolongeant l'expérience pendant une heure et demie, on avait recueilli environ un demi-centimètre cube de gaz ; début modeste de la science désignée aujourd'hui sous le nom d'électrochimie, qui ne pouvait pas faire prévoir que cette science révolutionnerait un jour l'industrie chimique. Wollaston, Davy, plusieurs autres se lancèrent dans la voie ainsi ouverte et recueillirent une ample moisson de découvertes importantes. Davy arrive à isoler les métaux alcalins dont Lavoisier avait hardiment affirmé l'existence sans arriver à les séparer de leurs combinaisons. Ses compatriotes lui offrent alors, au moyen d'une souscription, une pile de six cents éléments, que l'on installe à la Royal Institution, où Davy professait ; avec ce puissant appareil il décompose la chaux et la baryte. L'Institut de France reconnut l'importance des découvertes faites par le savant anglais en lui décernant, en 1808, un prix qui avait été fondé quelques années auparavant par le Premier Consul pour récompenser les découvertes faites dans le domaine de l'électricité. Peu de temps après, l'Empereur ordonna la construction d'une grande batterie de piles, analogue à celle de Davy. On la plaça à l'École polytechnique, où elle fut à la disposition de Gay-Lussac et de Thénard. Malheureusement, la première moisson de faits nouveaux était déjà faite, et cet effort tardif n'amena pas grand résultat. Un Mémoire de Gay-Lussac et Thénard publié en 1811 contient cependant la confirmation des résultats obtenus par Davy et des indications intéressantes sur les moyens les plus propres à les réaliser. En même temps, l'attention de ces deux savants était attirée sur les métaux que la pile ne permettait d'obtenir qu'en quantités infimes, et les orientait vers d'importantes découvertes purement chimiques sur ces corps nouveaux.

Cependant, le public scientifique anglais s'était, à son tour, piqué d'émulation. La pile construite à Paris était plus puissante que celle de Londres, qui d'ailleurs était presque hors d'usage. On ouvrit une souscription pour la remplacer par une plus puissante encore, et l'on put doter le laboratoire de la Royal Institution d'une pile de deux mille éléments. C'est avec cet appareil que Davy découvrit l'arc électrique, ce curieux phénomène qui a eu, depuis, de si importantes applications.

L'ÉLECTRO - MAGNÉTISME. — ØRSTED

C'était surtout l'électrochimie qui avait bénéficié de l'invention de la pile. Le moment allait venir où une autre propriété du « fil conjonctif » allait se révéler et montrer un lien tout à fait inat-

tendu entre les phénomènes électriques et ceux de l'aiguille aimantée. C'est au commencement d'avril de l'année 1820 que cette découverte capitale fut faite par le physicien danois Ørsted, alors professeur à l'Université de Copenhague.

L'idée d'une relation entre les phénomènes électriques et ceux que présente l'aiguille aimantée s'était bien des fois présentée à l'esprit des physiciens ; il est remarquable que presque toujours les mêmes hommes aient expérimenté sur les deux classes de phénomènes et les aient, presque inconsciemment, rapprochés les uns des autres. Coulomb avait montré que la loi des attractions magnétiques est la même que celle des attractions électriques. Mais toutes les tentatives pour trouver un lien concret avaient échoué. On avait probablement essayé surtout l'action de la pile sans fermer son circuit ; pour employer un langage moderne, on avait essayé de mettre en évidence une action magnétique d'un champ électrique invariable et une telle action n'existe pas. On n'était pas encore familiarisé, malgré les découvertes en électrochimie, avec le fait que dans le conducteur qui relie les deux pôles, il se produit des phénomènes nouveaux, irréductibles aux effets statiques. On n'avait même pas de mot pour désigner ce que nous appelons courant électrique ; on se servait de périphrases comme « conflit des deux électricités » et ce n'est qu'avec Ampère que le mot, avec l'idée qu'il exprime, prit place dans le langage des physiciens. Ørsted réussit là où bien d'autres avaient échoué parce qu'il essaya non plus l'action des pôles de la pile mais celle du fil métallique qui les relie sur l'aiguille aimantée. Il observa que cette aiguille subit une action, qu'elle est déviée de sa position première lorsque le fil est approché d'elle.

Cette mémorable découverte fut annoncée par une lettre en latin que l'auteur envoya, en juillet 1820, à un certain nombre de savants et aux directeurs des principaux recueils scientifiques d'Europe ; cette lettre fut immédiatement publiée en français, en italien, en anglais et en allemand. La traduction française parut dans les *Annales de chimie et de physique* que dirigeaient alors Arago et Gay-Lussac.

On a, plus tard, essayé de diminuer le mérite d'Ørsted soit en disant que sa découverte était fortuite, soit en affirmant qu'elle était presque attendue et ne faisait que confirmer des idées qui étaient dans l'air. En ce qui concerne les circonstances de la découverte, on peut seulement affirmer que le physicien danois avait, depuis longtemps, réfléchi aux relations possibles entre l'électricité et le magnétisme et que, si le hasard joua un rôle dans sa découverte, ce hasard se produisit alors que l'auteur cherchait ce qu'il allait trouver. Quant à l'impression produite sur les contemporains, ce fut non pas celle que donne un fait attendu, mais au contraire une

impression de profond étonnement. Il suffit, pour s'en convaincre, de lire la note que les éditeurs des *Annales de chimie et de physique* crurent devoir placer au bas de la lettre d'Ørsted pour empêcher de la part du lecteur un sentiment d'incrédulité. Cette note, signée de l'initiale A. (évidemment Arago), est ainsi conçue : « Les lecteurs des *Annales* auront remarqué que nous n'accueillons pas, en général, trop à la légère, les annonces des découvertes extraordinaires, et jusqu'ici nous n'avons eu qu'à nous applaudir de cette réserve ; mais à l'égard du Mémoire de M. Ørsted, les résultats qu'il renferme, quelques singuliers qu'ils puissent paraître, sont accompagnés de trop de détails pour donner lieu à aucun soupçon d'erreur. J'ajouterai d'ailleurs que M. le professeur de La Rive, de Genève, qui a découvert lui-même des phénomènes extrêmement curieux avec les puissantes piles voltaïques qu'il possède, ayant bien voulu me permettre d'assister à la vérification qu'il a faite des expériences de M. Ørsted devant MM. Prévost, Pictet, de Saussure, Marcet, de Candolle, etc., j'ai pu me convaincre moi-même de l'exactitude des résultats principaux donnés par le savant danois... »

**L'ÉLECTROMAGNÉTISME ET
L'ÉCOLE FRANÇAISE**

En France, la découverte fut accueillie avec un véritable enthousiasme. L'expérience fut connue à l'Académie des sciences dès le 11 septembre 1820 par un académicien (probablement Arago) qui venait de Genève où on avait pu la répéter immédiatement parce que l'on y avait sous la main les instruments nécessaires. Elle fut immédiatement refaite à Paris, et l'on y vit tout de suite un sujet d'étude physico-mathématique du plus haut intérêt. L'expérience d'Ørsted n'apportait qu'un résultat qualitatif ; les lois quantitatives du phénomène furent immédiatement examinées, toute une série de faits nouveaux furent découverts et en quelques mois, presque en quelques semaines, toute la science de l'électro-magnétisme se trouva définitivement fondée. Ce fut une œuvre collective, où les idées sont si complètement mises en commun, où les découvertes se succèdent si rapidement qu'il est souvent difficile de fixer exactement la part qui revient à chacun. On peut dire que la plupart des physiciens français de cette époque y prirent part. D'abord Laplace, qui trouvait là une occasion de démêler des actions newtoniennes d'un genre nouveau et parfois singulier ; Biot, travailleur infatigable, esprit un peu confus et écrivain prolix, mais expérimentateur consciencieux et habile ; Savart, déjà connu par des recherches d'acoustique, qui allait apporter un concours efficace dans des expériences délicates ; Savary, bon mathématicien, élève et collaborateur d'Ampère ; Arago, esprit ouvert, avide de nouveautés, toujours prêt à semer les idées ; Ampère enfin, à qui revient

la plus grande part dans les découvertes qui allaient se succéder, et qui, déjà grand mathématicien, devait se révéler comme un expérimentateur de premier ordre.

AMPÈRE C'est une figure singulièrement attachante que celle de ce mathématicien, timide et distrait, qui allait, plus que personne, contribuer à ouvrir la voie à toute l'industrie moderne. Il naquit à Lyon le 22 janvier 1775 ; son père était un négociant, instruit et estimé. Peu de temps après la naissance de leur fils, les parents d'Ampère se retirèrent aux environs de Lyon, à Poleymieux-lez-Mont-d'Or. Le jeune Ampère n'eut pas d'autre maître que son père, qui devina bien vite ses hautes facultés intellectuelles. Il dévora toute la bibliothèque paternelle, et en particulier les vingt volumes de l'*Encyclopédie*, qu'il lut en entier, volume par volume, par ordre alphabétique, sans se laisser rebuter par la variété des sujets traités, dont quelques-uns devaient être bien arides pour un enfant de quatorze ans. Sa mémoire était extraordinaire ; de longues années après, il pouvait encore réciter devant ses collègues de l'Institut des pages de l'*Encyclopédie* entièrement étrangères à ses travaux. Pour lire Euler et Bernoulli il apprit un peu de latin ; il était encore presque un enfant lorsqu'il était déjà familier avec les principales œuvres mathématiques de son temps.



AMPÈRE
(D'après un dessin de Boilly).

A ce moment, une catastrophe faillit arrêter pour toujours son développement intellectuel. En 1793 son père eut la fatale pensée de quitter le village de Poleymieux et de retourner à Lyon, où il accepta les fonctions de juge de paix. Après le siège de cette ville, il fut arrêté sous la qualification vague d'aristocrate et exécuté quelques jours plus tard. Ampère, qui avait alors dix-huit ans, fut terrassé par la douleur.

Ses facultés intellectuelles, déjà si développées, firent place à une véritable torpeur, et cet état dura plus d'une année. C'est, dit-on, la lecture des lettres sur la botanique de J.-J. Rousseau qui commença sa guérison. Sa mère était revenue à Poleymieux ; le jeune homme, pendant quelque temps, n'eut d'autre occupation que d'herboriser et de disséquer des fleurs. Un peu plus tard, il se perfectionna dans l'étude du latin pour pouvoir lire les odes d'Horace. La nécessité de se créer une situation, bien que ses parents fussent peu fortunés, ne lui était pas encore apparue ; le désir de se marier avec une jeune fille que le hasard lui avait fait rencontrer dans une de ses excursions botaniques, l'obligea à penser à cette nécessité. On songea un moment à le placer comme employé dans une boutique de soieries à Lyon ; après de longues réflexions, il choisit, ou l'on choisit pour lui, le métier de professeur libre. Il revint donc s'établir à Lyon, s'y maria, et se mit à donner des leçons de mathématiques ; il eut la bonne fortune d'y nouer de solides amitiés avec d'autres jeunes gens, avides comme lui de s'instruire, et dans ce petit cénacle on apprit en commun la chimie, par la lecture des Mémoires de Lavoisier qui soulevèrent chez Ampère un véritable enthousiasme. En août 1800 naquit son fils, Jean-Jacques Ampère, qui devait occuper un rang honorable comme écrivain. Cependant, les leçons de mathématiques ne lui procuraient probablement que des ressources insuffisantes ; il demanda et obtint en 1801 la chaire de physique à l'École centrale du département de l'Ain, ce qui l'obligea à la dure nécessité de partir pour Bourg en laissant à Lyon sa jeune femme déjà gravement malade et son fils. C'est à Bourg qu'il rédigea le premier ouvrage qui devait attirer l'attention sur lui. Il y traitait une question difficile sur le calcul des probabilités ; on y voit déjà poindre chez cet homme dénué de tout sens pratique, le souci de ne pas laisser une théorie abstraite sans conclusions réelles. Débarassé de tout appareil mathématique, le résultat de sa théorie peut être résumé ainsi : dans les jeux de hasard, tout joueur qui ne triche pas doit finir par se ruiner.

Le Mémoire d'Ampère, envoyé à l'Académie des sciences, fut examiné par Lalande et Delambre, qui le jugèrent favorablement. Très peu de temps après, Ampère obtenait le poste de répétiteur à l'École polytechnique. Dès son arrivée à Paris, il vécut à la fois dans deux sociétés fort différentes, celle des géomètres et celle des philosophes psychologues. Dans la première, il rencontrait la brillante phalange des savants de cette époque ; dans la seconde il avait d'interminables discussions avec Maine de Biran, Cabanis, etc. Chose curieuse, les problèmes relatifs à l'âme humaine semblent avoir tenu dans ses préoccupations une place beaucoup plus grande que les sciences mathématiques et physiques qui ont fait sa gloire. Il rêvait la publication d'un livre qu'il aurait intitulé : *Introduction à la philosophie*.

Cependant, il n'avait pas tout à fait abandonné l'étude des mathématiques ; des premières années du dix-neuvième siècle datent, de lui, plusieurs Mémoires importants sur le calcul des variations, sur les équations différentielles, sur les propriétés de la chaînette. C'est dans ce dernier Mémoire qu'est donnée, pour la première fois, l'équation de la courbe que prend un fil pesant fixé par ses deux extrémités. Ces travaux lui valurent en 1813 l'insigne honneur de succéder à l'illustre Lagrange comme membre de l'Institut. Il était déjà professeur d'analyse, puis de mécanique à l'École polytechnique ; il échangea plus tard cette chaire contre la chaire de physique au Collège de France.

Nous venons de voir Ampère surtout mathématicien ; mais son vaste esprit embrassait toutes les sciences. En 1814, il publie le Mémoire où il retrouve la loi d'Avogadro sur le nombre des molécules d'un gaz. Quelques publications sur la classification des sciences, où il s'annonce comme un précurseur d'Auguste Comte, montrent l'étendue de ses méditations. A partir de 1820, la découverte d'Ørsted lui ouvre un champ nouveau. Le rêveur, célèbre par ses distractions et par sa maladresse manuelle autant que par ses travaux mathématiques, se révèle tout à coup comme un expérimentateur de premier ordre, comme un physicien de génie, sachant à la fois expérimenter de la manière la plus judicieuse et construire une théorie sans perdre jamais de vue la réalité. Il s'y reprend à plusieurs fois avant d'amener sa théorie à la perfection finale, mais dès le début, en quelques semaines, les idées fondamentales sont clairement exposées. En 1825 se termine cette partie, la plus glorieuse, de son existence scientifique. Elle lui valut l'admiration de ses contemporains, et celle de la postérité n'a fait que grandir.

Célèbre comme savant, Ampère l'était, aussi, on le sait, par ses distractions et son manque d'esprit pratique. Cette tournure particulière de son esprit fut, dans sa carrière, la cause de plus d'un déboire ; il fallait toute l'admiration qu'inspiraient ses travaux pour que ses élèves et ses confrères le prissent tout à fait au sérieux. Le grand-père de celui qui écrit ces lignes avait suivi les leçons d'Ampère à l'École polytechnique ; soixante ans plus tard, il égayait encore ses petits-enfants en leur racontant les distractions du « bonhomme Ampère » et les plaisanteries auxquelles se livrait à son égard, tout en l'aimant et le respectant beaucoup, son jeune collègue Arago. Les nécessités de l'existence avaient fait d'Ampère non seulement un professeur (et Arago affirme que « sa vocation était de ne pas enseigner ») mais encore un administrateur. Il fut, pendant longtemps, inspecteur général de l'enseignement public, et ces fonctions l'obligeaient, chaque année, à une tournée à travers les collèges de province, où il avait à examiner comment étaient enseignés

les éléments de l'arithmétique et comment les jeunes élèves étaient nourris. Chacune de ces tournées devait être suivie d'un rapport, que les bureaux du ministère ne pouvaient obtenir qu'après de nombreux rappels. Revenu à Paris, il reprenait ses leçons au Collège de France, où il développait le fruit de ses méditations pendant ses voyages. C'est dans une de ces tournées d'inspection qu'il mourut. Déjà malade, il avait voulu cependant faire le voyage auquel il était tenu par ses fonctions. A Marseille, son état s'aggrava ; il mourut à l'infirmerie du lycée le 10 juin 1836.

DÉCOUVERTE DES LOIS DE L'ÉLECTRO-MAGNÉTISME

La découverte d'Ørsted avait été annoncée à l'Académie des sciences le 11 septembre 1820. Sept jours après, le 18 septembre, Ampère apportait son premier Mémoire, où il démontrait l'action réciproque de deux fils traversés par des courants, sans l'intervention d'aucun aimant. De semaine en semaine, ses communications se succèdent, le 25 septembre, les 9, 16 et 30 octobre, le 6 novembre, et chacune apporte quelque résultat nouveau. Nous savons par sa correspondance que l'importance du sujet lui était apparue avec une parfaite clarté et que la réflexion et l'expérimentation ne lui laissaient pas un instant de répit ; il en interrompit même sa correspondance avec son fils, qui était pour lui le plus doux des devoirs ; dans une de ses lettres, il explique pourquoi un long retard s'est produit dans cette correspondance : en réfléchissant aux lois de l'électro-magnétisme, il a oublié de porter à la poste une lettre écrite depuis longtemps. Les autres physiciens ne restent pas inactifs ; le 25 septembre, Arago annonce que le fer s'aimante au voisinage d'un fil traversé par le courant électrique. Ampère aperçoit immédiatement que l'action sera fortement augmentée si l'on replie le fil en hélice et si l'on introduit suivant l'axe de cette hélice la tige de fer ; l'électro-aimant était inventé, et l'on sait quel cortège d'applications devait suivre cette découverte. Quant à l'action que le courant exerce sur l'aiguille aimantée, Ørsted avait seulement montré le fait et n'avait découvert aucune loi simple pour prévoir la grandeur ni même le sens de l'action ; en quelques jours, l'école française débrouille tout. Ampère donne la loi simple qui fait connaître le sens de l'action exercée : l'observateur couché sur le fil de telle manière que le courant aille de ses pieds à sa tête (on l'appellera toujours l'*observateur d'Ampère*) et regardant le pôle nord de l'aiguille, voit ce pôle dévié vers sa gauche. Dès le 30 octobre, Biot et Savart apportent une série de mesures précises sur la grandeur de la force ainsi exercée. Ils appliquent, presque sans changement, les méthodes qui avaient si bien réussi à Coulomb pour découvrir les lois de l'électro-statique, et ils arrivent à trouver la loi qui donne l'action exercée

par un fil rectiligne. Dès le lendemain, Laplace en déduit la *loi élémentaire*, qui permet de trouver l'action exercée par un conducteur de forme quelconque en faisant la résultante des actions exercées par ses différents éléments.

Dans tout cet immense ensemble de faits nouveaux, celui qui avait le plus vivement frappé Ampère était l'action réciproque de deux circuits traversés par des courants. Dès les premiers jours de ses recherches, il avait imaginé et réalisé les appareils délicats qui allaient lui servir à la découvrir et à l'étudier ; avec les moyens dont on disposait alors, il s'agissait de forces très faibles, qui se manifestaient sur des fils faisant partie d'un circuit, qu'il fallait rendre mobiles sans que le circuit fût interrompu. Les actions mécaniques ainsi produites apparaissent immédiatement à Ampère comme le fait fondamental. Tandis que la plupart de ses contemporains cherchent à tout ramener à des aimantations, il voit de suite que la marche inverse est la marche rationnelle ; là où l'on disait, d'une manière très vague : « le courant électrique a pour effet d'aimanter le fil », il dit au contraire : « un aimant n'est autre chose qu'un agrégat de petits courants électriques ». La loi de l'action réciproque des courants devait alors lui apparaître comme la loi fondamentale.

Il dut s'y reprendre à plusieurs fois pour arriver à la formule exacte. Le 10 juin 1822, il donne une formule dans laquelle figurait encore une constante dont il laissait la valeur indéterminée ; il paraissait vouloir s'en tenir là ; il semblait même, un moment, pencher pour un choix de cette constante qui était inexact ; la question lui paraissait épuisée. Le mathématicien Savary rappela son attention par un Mémoire lu à l'Académie le 3 février 1823, où il développait, par des calculs élégants, les conséquences de la formule encore imparfaite donnée par Ampère. Très peu de temps après, Ampère arrivait à la formule exacte. Il s'est toujours plu à reconnaître ce qu'il devait au travail de Savary. Dans une note manuscrite sur un de ses Mémoires, il dit, en parlant des calculs de Savary : « Je dois déclarer que, sans ce secours, je n'aurais pas pu tirer de ma formule toutes les conséquences que je me propose de faire connaître ».

Son œuvre étant réellement achevée, Ampère se décida à en faire un exposé d'ensemble, où tous les résultats seraient rigoureusement déduits. Il le fit dans un admirable ouvrage dont le titre est : *Mémoire sur la théorie mathématique des phénomènes électrodynamiques, uniquement déduite de l'expérience*. Achievé probablement en 1825, ce travail, très étendu, ne parut qu'en 1827, dans les *Mémoires de l'Académie des sciences*. Les résultats qu'il contenait étaient d'ailleurs déjà connus de tout le monde.

Ce n'est pas seulement en France que les travaux sur l'électro-magnétisme

avaient soulevé une vive curiosité. En Suisse, de la Rive suivait de près les travaux des savants français, et apportait un contingent intéressant d'expériences nouvelles. En Angleterre, Davy répétait l'un des premiers l'expérience d'Ørsted ; son jeune élève Faraday était vivement frappé par ces expériences, et entraîna bientôt en correspondance avec Ampère pour lui signaler divers cas très curieux de rotations produites par les actions électro-magnétiques. C'est ce jeune physicien anglais qui devait, quelques années plus tard, achever le cycle des grandes découvertes dans cette branche de la physique par celle des courants d'induction.

Ce qui frappe dans l'œuvre d'Ampère, en dehors des grandes lois qu'il a découvertes, c'est la parfaite clarté des idées. Dès son premier Mémoire, huit jours après la découverte d'Ørsted, il s'exprime avec une admirable précision dans un sujet sur lequel il n'avait jamais écrit. Nous n'aurions rien à changer à la distinction qu'il introduit entre les effets de tension (ou phénomènes électrostatiques) et les effets de courant ; il s'en fallait de beaucoup que la distinction eût cette netteté chez la plupart de ses contemporains. Le nom même de *courant électrique*, la notion claire de son *intensité* apparaissent ici pour la première fois, et c'est avec justice que le nom d'Ampère a été donné à l'unité qui sert à mesurer cette intensité. Quant à la célèbre loi qui résume l'action exercée par un courant sur un autre courant, elle est toujours admirée, bien qu'ayant perdu beaucoup de son intérêt. Le point de vue a changé. La loi élémentaire était le dernier triomphe de la physique newtonienne, où tout se ramène à des actions à distance déterminées par la place relative des objets en présence. Sous l'impulsion de Faraday, de Fresnel, de Clerk Maxwell, allait se fonder la physique de l'action de milieu, dont les concepts fondamentaux devaient survivre à la disparition même de l'idée de l'éther matériel. Pour arriver à ce degré supérieur de simplicité, l'œuvre d'Ampère était une étape nécessaire ; personne n'a plus complètement rendu hommage à son génie que le grand disciple de Faraday, le fondateur de la théorie électro-magnétique de la lumière, Maxwell, qui écrivait : « Les recherches d'Ampère, par lesquelles il établit les lois de l'action mécanique des courants électriques les uns sur les autres, comptent parmi les faits les plus brillants qui se soient jamais produits dans la science. Théorie et expériences semblent avoir jailli dans leur pleine puissance et dans leur plein achèvement du cerveau de ce Newton de l'électricité ».

LES COURANTS INDUITS

Une grande découverte restait à faire dans le domaine de l'électro-magnétisme, celle des courants induits ; elle fut faite, de l'autre côté de la Manche, par Faraday, un génie égal à celui d'Ampère, mais

extrêmement différent. Ampère était avant tout mathématicien ; Faraday avait une vue plus simple et plus directe des choses ; il était surtout expérimentateur. Arago, Ampère lui-même, avaient, pour ainsi dire, passé à côté de cette grande découverte ; leurs observations non expliquées ne furent probablement pas sans influence sur les recherches de Faraday.

Sachant qu'un courant agit sur un aimant, on s'était demandé, de divers côtés, si la seule présence d'un aimant ne suffirait pas pour engendrer un courant dans un circuit fermé. Une telle question montre combien on était loin des idées actuelles sur la conservation de l'énergie, puisque la production indéfinie d'un courant dans un circuit immobile au voisinage d'un aimant aurait constitué un cas évident de mouvement perpétuel, ou plutôt de création perpétuelle d'énergie. Ainsi qu'on aurait dû s'y attendre, toutes ces tentatives (dont une est signée du nom de Fresnel) échouèrent ; c'est seulement pendant un déplacement ou pendant la période variable d'un courant que l'on pouvait s'attendre à trouver l'effet cherché. Ampère aurait, dit-on, observé au moins une fois un phénomène de cette espèce. Ayant suspendu une bague de cuivre à côté d'un électro-aimant, il vit cette bague subir une action mécanique chaque fois que le courant qui actionnait l'électro était interrompu ou rétabli ; c'était le premier exemple de *courant induit* dans la bague, par variation du champ magnétique de l'aimant. Ampère n'aperçut pas l'importance du fait, et n'insista pas.

Un autre phénomène qui attira davantage l'attention fut découvert par Arago, à la suite d'une observation fortuite de Gambey, constructeur d'appareils de précision, célèbre par la perfection avec laquelle ses instruments étaient réalisés. Les boussoles étaient parmi les instruments que Gambey construisait le plus fréquemment ; une difficulté, dans leur emploi, vient de ce que, si l'aiguille aimantée est écartée de sa position d'équilibre, elle n'y revient qu'après une longue série d'oscillations, comme le ferait un fil à plomb écarté de la verticale et abandonné à lui-même. Gambey remarqua que lorsqu'un disque de cuivre immobile est placé au-dessous de l'aiguille, le mouvement de celle-ci s'amortit très rapidement, sans que sa position d'équilibre, soit en rien modifiée. Gambey profita de cette action mystérieuse pour améliorer la construction des boussoles, et, en ouvrier curieux de connaître la cause des pratiques de son art, il demanda à Arago de lui expliquer pourquoi un disque de cuivre empêchait l'aiguille d'osciller. La question était embarrassante ; tout ce que put faire Arago, fut de répéter l'expérience sous une autre forme et de lui donner un nom. Il vit tout de suite que le phénomène observé ne devait dépendre que du mouvement relatif de l'aiguille et du disque ;

en laissant l'aiguille immobile et en faisant tourner le disque au-dessous d'elle, il constata que l'aiguille était soumise à une action tendant à l'entraîner dans le sens de rotation du disque. Arago donna à ce phénomène le nom de magnétisme de rotation (1824). Ce fait resta isolé et inexpliqué ; Arago était tenté de l'attribuer à une trace de fer dans le disque de cuivre, ce qui d'ailleurs ne rendait pas l'explication plus facile. Plusieurs physiciens étrangers publièrent des recherches sur le « magnétisme de rotation », sans arriver à en comprendre la cause. Ces recherches avaient du moins attiré l'attention sur les phénomènes qui peuvent se produire lorsque l'aimant et un conducteur se déplacent l'un par rapport à l'autre ; c'est dans cette voie que Faraday allait, en 1831, faire la grande découverte des courants d'induction ; la première application qu'il en fit fut justement l'explication du « magnétisme de rotation » d'Arago.

Ampère fut des premiers à comprendre l'importance de la découverte de Faraday. Il reproduisit les nouvelles expériences dans son cours du Collège de France, et il vit immédiatement la possibilité de construire des machines produisant le courant électrique par simple dépense de travail mécanique. Dès 1832, Pixii, constructeur d'instruments de physique à Paris, construisait l'une des premières machines d'induction, ancêtre des modernes « dynamos ». Il y appliquait le commutateur, imaginé par Ampère, pour transformer le *courant alternatif*, que produit naturellement la machine, en *courant continu*.

Tous les grands faits relatifs aux propriétés des courants électriques étaient dès lors connus. Il va falloir attendre près de quarante ans avant que les grandes applications ne prennent naissance.

ACTION DU MILIEU En même temps qu'il enrichissait la physique d'un de ses plus importants phénomènes, Faraday commençait une révolution qui, pour être surtout dans la forme et sans apporter véritablement de fait nouveau, n'en était pas moins de très grande importance : là où les autres voyaient une action à distance, il met au premier rang l'action du milieu. Réduite à son squelette mathématique, l'idée peut s'exprimer ainsi : toute action à distance, par exemple celle d'un aimant sur un autre aimant, se fait en deux étapes. L'aimant agissant modifie en quelque manière les propriétés du milieu qui l'entoure ; il met cet espace dans un état spécial, il y crée un *champ magnétique*. C'est ce champ (qui aurait pu être créé par de tout autres moyens) qui agit sur le second aimant, comme agirait tout autre champ magnétique produit par tout autre procédé.

En face de cette nouveauté, exprimée d'abord en un langage qui manquait

de clarté, les physiciens français, avec leur amour de la précision, même un peu sèche, gardèrent longtemps une attitude, sinon hostile, du moins indifférente. Il leur semblait que cela n'apportait rien de nouveau, que le *champ magnétique* et le *champ électrique* de Faraday avaient quelque chose de mystérieux ne répondant à aucune réalité tangible, et qu'il valait mieux s'en tenir au point de vue newtonien de l'action à distance, élément sur élément. Ce jugement était injuste. Sans même chercher autre chose que le calcul des phénomènes, les idées de Faraday étaient intéressantes. Les deux manières de voir, la méthode newtonienne et celle de Faraday, conduisaient, naturellement, aux mêmes résultats, et c'est en ce sens que l'on pouvait dire que le point de vue de Faraday n'apportait rien de nouveau ; mais en décomposant la difficulté, selon le précepte de Descartes, on simplifiait beaucoup le problème. Il y a plus ; en introduisant de nouvelles manières de penser, Faraday ouvrait la voie à de magnifiques découvertes. C'est en associant ses idées aux découvertes de Fresnel, en mettant en commun la clarté mathématique française et l'intuition anglaise que Clerk Maxwell devait arriver à la théorie électro-magnétique de la lumière, l'une des plus extraordinaires découvertes de la physique de tous les temps.

VI

LES PROGRÈS DE L'OPTIQUE. — FRESNEL ET LA THÉORIE DE LA LUMIÈRE

INSUFFISANCE DE L'OPTIQUE DE NEWTON Tout le dix-huitième siècle, nous l'avons vu, était resté comme figé dans l'admiration de l'œuvre de Newton. Les quelques dissidents n'étaient pas bien dangereux, ni même parfois bien perspicaces lorsqu'ils s'attaquaient à la partie la plus incontestable de l'œuvre du grand Anglais. Goethe, l'illustre poète allemand, va jusqu'à vouloir repousser les idées de Newton sur la composition de la lumière blanche et sur les radiations simples indécomposables, remettant ainsi en question une découverte définitive ; il fait preuve d'une incompréhension des faits élémentaires qui étonne chez un aussi grand esprit. Ce n'est pas lui qui peut atténuer l'influence trop exclusive de Newton et de ses trop fervents disciples.

Il aurait dû cependant paraître évident que toute une catégorie de phénomènes, ceux que nous appelons aujourd'hui phénomènes d'interférence, s'accommodait mal de la simplicité de l'image que la théorie de l'émission donnait du rayon

lumineux ; Newton avait déjà fait une étude magistrale du plus simple et du plus beau d'entre eux, le phénomène des lames minces, dont les colorations d'une bulle de savon offrent l'exemple le plus familier. Il avait aperçu l'intervention, dans ces phénomènes, d'un élément périodique et il avait mesuré, avec une précision qui ne laissait rien à désirer, la période dans l'espace, que nous appelons aujourd'hui la longueur d'onde, pour chaque espèce de rayons. Ni Newton, si ses disciples, ne surent voir l'importance de cette quantité ; les rares défenseurs de la théorie des ondes ne furent pas plus perspicaces, et aucun d'eux, si ce n'est d'une manière isolée et peu précise, n'eut même l'idée d'introduire la notion de mouvement périodique dans cette théorie.

L IDÉE DE PÉRIODICITÉ DANS LE RAYON LUMINEUX C'est au commencement du dix-neuvième siècle que cette notion de périodicité prend toute sa valeur, avec l'Anglais Thomas Young, une des plus vastes intelligences que l'espèce humaine ait produites. Médecin, philologue, archéologue, physicien, physiologiste, amateur en toutes choses, il sema partout des idées ; il fallut le travail de toute une génération d'hommes pour les faire fructifier. Il resta toute sa vie en relations personnelles avec les savants français, qui l'estimaient à sa juste valeur, tout en voyant bien ce qui lui manquait. Comme physicien, il lui manquait cette solide culture mathématique, qui était au contraire la caractéristique des nôtres, sans laquelle on ne peut rien énoncer de définitif. Ce n'est pas sans raison que Laplace lui reprochait de n'avoir jamais bien compris la différence qu'il y a entre un simple aperçu et une véritable démonstration.

C'est cependant à Young que revient incontestablement l'honneur d'avoir introduit la notion de périodicité dans la théorie des ondulations, d'avoir montré qu'en optique, comme en acoustique, des mouvements peuvent se détruire, d'avoir donné l'explication correcte des couleurs de lames minces et d'avoir entrevu la nécessité des vibrations transversales pour expliquer la polarisation de la lumière. Mais dans tout cela, comme dit Laplace, il y avait plus d'aperçus que de démonstrations ; toute l'optique moderne était en germe dans les écrits de Thomas Young, publiés entre 1801 et 1807, mais rien n'était définitif. Il allait falloir le génie de Fresnel, complémentaire en quelque sorte de celui d'Young, pour lui donner une base solide.

D ÉCOUVERTE DE FAITS NOUVEAUX Mais auparavant, la découverte d'une importante série de faits nouveaux, dans les premières années du dix-neuvième siècle, devait donner un aliment aux futures méditations de Fresnel, qui, par

un heureux hasard, allait trouver devant lui les faits les plus importants à expliquer sans y rencontrer un encombrement qui l'aurait découragé. Ces découvertes étaient dues à la curiosité, alors très vive, pour les propriétés des cristaux naturels ; leur pouvoir de dédoubler un rayon lumineux excitait encore une grande curiosité. Rochon, à la fin du dix-huitième siècle, avait appris à utiliser un prisme biréfringent en quartz pour mesurer avec précision de petits angles. Les cristaux de spath d'Islande étaient entre les mains de beaucoup de physiciens, qui les examinaient avec intérêt. Ce fut l'occasion de la découverte, par Malus, d'une propriété capitale de la lumière, déjà entrevue par Huygens, mais dont la généralité et l'importance avaient passé inaperçues. Cette propriété consiste en ce qu'un rayon de lumière peut, dans des circonstances très fréquentes, acquérir une sorte de dissymétrie qui fera dire que le rayon est polarisé.

Comme la plupart des grands hommes de science de son temps, Malus était d'abord un homme d'action. Reçu à l'École du génie de Mézières en 1792, l'année même où cette école fut supprimée, il s'enrôle comme volontaire dans le génie ; il est remarqué par un de ses chefs qui, sans autre formalité, l'envoie comme élève à l'École polytechnique tout récemment créée. Redevenu officier du génie, il prend bientôt part à l'expédition d'Égypte, où il faillit mourir de la peste après le siège de Jaffa. Avec Monge et Fourier, il ne quitte l'Égypte qu'avec les derniers débris de l'armée. Il achève sa courte carrière comme lieutenant-colonel ; il était examinateur à l'École polytechnique et remplissait les fonctions de directeur des études lorsqu'il mourut, en 1811, à l'âge de trente-sept ans.

Dès l'expédition d'Égypte, Malus avait commencé à réfléchir aux lois de l'optique ; à partir de 1807, il consacre à cette science tous ses loisirs. Intéressé, comme beaucoup de ses contemporains, par les propriétés des cristaux, il est de ceux qui tirent de l'oubli les travaux de Huygens ; il met en formules la construction géométrique que ce grand physicien avait donnée pour suivre la marche d'un rayon et, par des expériences précises, en vérifie l'exactitude. C'est en poursuivant ces expériences qu'il découvre, en 1808, la polarisation de la lumière par réflexion. Un jour, de sa maison de la rue d'Enfer, il regardait, à travers un cristal de spath d'Islande, les fenêtres du Luxembourg éclairées par le soleil ; il s'aperçut avec étonnement qu'en faisant tourner le cristal sur lui-même, chacune des deux images disparaissait à son tour. Il reconnut immédiatement que ce phénomène était lié à la réflexion que la lumière avait subie sur les vitres, et il le reproduisit à volonté en examinant la lumière réfléchie sur une surface de verre ou d'eau. Sans pouvoir expliquer le phénomène, il en démêle les lois, en montre la généralité, en indique le lien avec

une expérience de Huygens qui était restée comme isolée et inaperçue. Le nom de *lumière polarisée* précise que cette propriété est liée à une sorte de dissymétrie que ne possède pas la lumière naturelle, mais qu'elle peut acquérir sous des influences très diverses.

La découverte de Malus souleva en France un vif mouvement de curiosité et fut l'origine, de la part d'Arago, de Biot, de Malus lui-même, d'une ample moisson de faits nouveaux. On s'aperçoit peu à peu que le phénomène observé par Malus est, en réalité, très commun, et que la nature en offre de nombreux exemples ; c'est ainsi qu'Arago découvre, en 1811, la polarisation de la lumière venant du ciel bleu. La même année, le même Arago étudie ce qui se passe lorsqu'une lame d'un corps cristallisé est interposée entre l'appareil qui polarise la lumière et celui qui sert à reconnaître son état de polarisation ; cela le conduit à découvrir les magnifiques colorations qui se produisent, et qui se rapportent à deux catégories de phénomènes, ceux de polarisation chromatique et ceux de polarisation rotatoire. Biot en entreprend aussitôt l'étude expérimentale et arrive à en démêler les lois les plus simples ; il essaie d'édifier une théorie, mais, attaché fermement à la théorie de l'émission, il n'arrive qu'à des explications purement verbales qui, même au prix d'une extrême complication, ne relient que très imparfaitement les phénomènes. En 1815, Biot découvre les propriétés rotatoires de certains liquides comme l'essence de térébenthine, propriétés liées non à la forme cristalline, mais à la substance même qui agit ; le phénomène ainsi découvert devait avoir une influence considérable sur le développement de certaines théories chimiques. Moins de dix ans avaient suffi à la découverte, par le même groupe d'hommes, de la plupart des phénomènes importants qui manquaient à l'optique. Il restait à les coordonner et à les relier par une théorie simple et complète. Ce fut, en grande partie, l'œuvre de Fresnel.

F^{RESNEL} Né à Broglie, dans le département de l'Eure, en 1788, Fresnel, après avoir commencé ses études à l'École centrale de Caen, entra à l'École polytechnique et en sortit dans le service des ponts et chaussées. Après ses années d'école d'application, il fut envoyé, pour entretenir et construire des routes, d'abord en Vendée puis, en 1812, à Nyons, petit chef-lieu d'arrondissement du département de la Drôme. Ses occupations d'ingénieur ne semblent pas lui avoir laissé de très bons souvenirs ; un peu plus tard, il écrivait à son oncle, Léonor Mérimée (le père de l'écrivain Prosper Mérimée) : « Je ne trouve rien de si pénible que d'avoir à mener des hommes, et j'avoue que je n'y entends rien du tout. » Son caractère méditatif, plus porté à la réflexion qu'à l'action, le rendait peu apte aux

occupations dont il était chargé. « La nécessité de gronder et de faire le méchant », dit-il dans une autre lettre, le rend très malheureux. La solitude dans laquelle il se trouve à Nyons lui donne le désir de se distraire par l'étude, mais il est dépourvu de tout moyen de travail. En 1814, il commence à réfléchir sur les difficultés auxquelles conduit la doctrine de la matérialité du calorique et de la lumière. Il ne semble d'ailleurs pas très bien préparé à des recherches de ce genre. Dans une lettre à son frère Léonor, comme lui ingénieur des ponts et chaussées, il demande l'envoi du traité de physique de Haüy, et il ajoute : « Je voudrais bien avoir aussi des mémoires qui me missent au fait des découvertes des physiciens français sur la polarisation de la lumière. J'ai vu dans le *Moniteur*, il y a quelques mois, que Biot avait lu à l'Institut, un Mémoire fort intéressant sur la *polarisation de la lumière*. J'ai beau me casser la tête, je ne devine pas ce que c'est. »

Les événements politiques de 1815 allaient lui donner des loisirs. Convaincu que le retour au régime impérial serait un grand malheur pour son pays, Fresnel abandonna son poste et courut se joindre à la petite armée qui, sous les ordres du duc d'Angoulême, tentait de résister à Napoléon revenu de l'île d'Elbe. Suspendu de ses fonctions d'ingénieur au début des Cent-Jours, il fut mis en surveillance à Nyons, puis autorisé à résider au village de Mathieu, près de Caen, où sa mère s'était retirée. Il put, en passant à Paris, se mettre en relations avec Arago, à peine plus âgé que lui, mais déjà célèbre et jouissant d'une grande influence dans les milieux scientifiques. Une vive amitié devait, par la suite, lier ces deux hommes, et contribuer à faire sortir Fresnel de son isolement.

Dès son arrivée à Mathieu, Fresnel reprend ses réflexions sur l'optique ; il s'attaque au problème le plus simple en apparence, le plus difficile en réalité : l'explication de la propagation rectiligne de la lumière. Si l'on admet la théorie des ondes, comment expliquer qu'un obstacle, même très petit, puisse arrêter complètement la lumière ? Un corps flottant n'arrête pas les vagues de la mer, un tronc d'arbre n'empêche pas le son de se propager. Fresnel éclaire toute la question en y introduisant l'idée de mouvement périodique et le principe des interférences, d'après lequel deux mouvements vibratoires peuvent se détruire ; il exprime ce principe, un peu plus tard, par cette formule devenue célèbre : « De la lumière, ajoutée à de la lumière, peut produire de l'obscurité. » Il fallait vérifier par des expériences délicates les conséquences de la théorie ; Fresnel, au village de Normandie où il était réfugié, ne disposait d'aucun appareil. Il y suppléa avec une rare ingéniosité. Le serrurier du village lui construisit les quelques supports qui lui sont nécessaires ; une goutte de miel déposée sur un trou fait dans une feuille de cuivre lui sert de

lentille pour obtenir, au moyen des rayons solaires renvoyés par un miroir, le point lumineux nécessaire à ses expériences. Le 15 octobre et le 10 novembre 1815, il adresse à l'Académie des sciences deux Mémoires « sur la diffraction » ; il y retrouve plusieurs des aperçus dus à Young, mais il pousse beaucoup plus loin les conséquences de la théorie.



AUGUSTIN FRESNEL
(D'après un portrait de A. Tardieu).

Cependant, Fresnel avait été réintégré dans le corps des ponts et chaussées par le gouvernement royal ; sur l'intervention d'Arago, il fut autorisé à résider à Paris pendant une partie de l'année 1816, mais dut bientôt accepter un poste où l'attendait un service des plus pénibles : la surveillance d'un des ateliers de charité, celui de Rennes, que l'administration des Travaux publics avait établis à la suite de la disette de 1816. Ce n'est qu'en 1818 qu'une nomination à un emploi dans le service du canal de l'Ourcq lui permit de résider définitivement à Paris. Malgré ces déplacements successifs, absorbé par un service dont il s'acquittait consciencieusement, il n'avait pas cessé de penser au

problème qui l'avait occupé pendant son séjour à Mathieu.

Les idées régnantes dans les milieux scientifiques français étaient, dans l'ensemble, nettement défavorables au point de vue qu'adoptait Fresnel. Plus que jamais, les idées newtoniennes étaient à la mode ; en ce qui concerne la lumière, Laplace, Biot, Poisson, Malus croyaient fermement qu'il suffirait de quelques retouches pour que les corpuscules newtoniens pussent se plier à l'explication de tous les phénomènes ; il est vrai que chaque phénomène nouveau exigeait une nouvelle hypothèse plus compliquée que les précédentes, mais cet échafaudage ne les effrayait pas. Seuls, quelques esprits indépendants sentaient combien tout cet ensemble était artificiel et souhaitaient une théorie plus satisfaisante. Au premier

rang de ces novateurs était le jeune et brillant Arago, et aussi le timide Ampère, qui n'avait pas encore le prestige que devait lui donner la découverte des lois de l'électro-magnétisme. Les deux courts Mémoires de Fresnel allaient rappeler l'attention sur les difficultés des théories de l'optique, et l'Académie allait montrer qu'elle ne s'en désintéressait pas.

L A DIFFRACTION DE LA LUMIÈRE

L'usage des « concours académiques » n'était pas, alors, tombé presque en désuétude pour les sujets scientifiques ; plusieurs fois, vers cette époque, les sujets proposés avaient appelé l'attention des hommes de science sur une question intéressante et amené la publication de travaux importants. Vers la fin de 1817, l'Académie décida de mettre au concours, pour le grand prix des sciences mathématiques à décerner en 1819, une étude des phénomènes de diffraction. Le programme, évidemment rédigé sous l'influence de Laplace, semblait, il est vrai, indiquer nettement que la théorie de l'émission devrait être prise comme guide ; peut-être espérait-on que le mouvement des particules lumineuses, lorsqu'elles frôlent un obstacle, allait être éclairci par des méthodes analogues à celles qui avaient permis d'établir les perturbations subies par les planètes. Quoi qu'il en soit, le résultat fut exactement inverse, et la théorie des ondes sortit victorieuse du combat.

Sur le conseil d'Arago et d'Ampère, Fresnel se décida à concourir. Il reprit l'ébauche datant de deux ans et, dès le 28 juillet 1818, il envoya à l'Académie son célèbre *Mémoire sur la diffraction*. Les questions formellement posées par l'Académie n'y tiennent qu'une place secondaire. L'auteur prend le problème de beaucoup plus haut, et se propose de soumettre le système de l'émission et celui des ondes à l'épreuve d'une comparaison avec l'ensemble des phénomènes qui se produisent lorsque la lumière rencontre des corps opaques. Des expériences nombreuses lui montrent que le système de l'émission est incapable de rendre compte du moindre fait exactement observé ; le système des ondes, tel qu'on le trouve dans les écrits d'Young, ne donne qu'un aperçu sans conséquences précises ; mais une conception plus exacte de la théorie fait évanouir les difficultés, et conduit, dans les cas les plus simples comme dans les plus compliqués, à rendre compte dans leurs moindres détails des faits observés, même de ceux qui apparaissent au premier abord comme de nature tout à fait paradoxale. De nombreux exemples sont étudiés par l'expérience, ombre d'un fil ténu comme un cheveu, ou d'une étroite ouverture, ou d'un écran à bord rectiligne, et toujours l'accord avec la théorie est complet.

Le Mémoire de Fresnel fut soumis au jugement d'une commission, où trois partisans déclarés de la théorie newtonienne de l'émission, Laplace, Biot et Poisson, se trouvaient réunis à Arago, tout acquis aux idées nouvelles, et à Gay-Lussac, peu familiarisé par ses études avec les questions agitées, mais disposé par caractère à une sage impartialité. Un incident, qui a été raconté par Arago, fit une grande impression sur la commission. Poisson, avec son remarquable esprit mathématique, remarqua tout de suite une conséquence singulière des formules de Fresnel, conséquence que l'auteur lui-même n'avait pas aperçue. En éclairant un petit disque opaque par un point lumineux et en examinant le petit cercle d'ombre projetée, on devait observer, au centre de cette ombre, un point vivement éclairé. Poisson présenta immédiatement à ses confrères cette conséquence paradoxale comme entraînant la condamnation de toute la théorie. Fresnel, aussitôt prévenu par Arago, fit l'expérience, et constata l'existence de la tache lumineuse prévue par sa théorie ; dès le lendemain, Arago pouvait faire connaître à Poisson la confirmation éclatante de la théorie des ondes que, sans le vouloir, il avait donné l'occasion de faire découvrir. Poisson cessa, à partir de ce moment, de combattre la théorie, et le Mémoire de Fresnel fut couronné par l'Académie et imprimé un peu plus tard dans ses publications.

POLARISATION DE LA LUMIÈRE
ET OPTIQUE CRISTALLINE

A partir de ce moment, les découvertes se succèdent avec une rapidité presque incroyable. Ce sont d'abord les propriétés de la lumière polarisée qui attirent l'attention de Fresnel. Là encore, il rencontre des aperçus de génie de son contemporain Thomas Young, mais seulement des aperçus. Tantôt seul, tantôt en collaboration avec Arago, il étudie les interférences des rayons polarisés et arrive à cet énoncé célèbre : « Deux rayons polarisés à angle droit sont incapables d'interférer. » Il en déduit cette importante conséquence : « Les vibrations qui constituent la lumière sont transversales. » Au lieu d'être, comme celles qui propagent le son dans l'air, dirigées suivant la direction de la propagation, elles lui sont perpendiculaires. Pour la lumière polarisée, cette vibration est rectiligne, tandis que pour la lumière naturelle elle est indistinctement dans toutes les directions. Une fois encore, Fresnel heurtait les idées reçues, et tout en admirant ses vues audacieuses, ses meilleurs amis avaient de la peine à le suivre. Même Arago ne pouvait admettre que la propagation à travers un milieu, l'éther plus ou moins vaguement qualifié de « fluide », pût se faire par vibrations transversales. C'est un des cas, assez nombreux dans l'histoire de la physique, où un mot, employé d'abord d'une manière vague et

non définie, a pu ralentir le progrès d'une science. En disant que l'éther est un fluide, on avait sans doute voulu dire simplement que c'était un milieu non solide, n'offrant au mouvement qu'une résistance insensible ; mais ce mot signifiait bien autre chose pour les mathématiciens comme Poisson, et même pour Arago ; il signifiait un milieu ayant les propriétés d'un liquide ou d'un gaz ; un tel milieu est, en effet, incapable de propager les vibrations imaginées par Fresnel. Au fond de ce différend, il y avait, d'ailleurs, plus qu'une querelle de mots ; il y avait toute la difficulté que nous avons à imaginer les propriétés de l'éther, milieu non directement perceptible, mais inventé pour transmettre les vibrations dont l'existence est certaine. Après d'innombrables tentatives pour construire ce milieu à l'image des corps élastiques que nous savons manier, la physique moderne a fini par se désintéresser complètement de la question et par étudier les vibrations sans chercher à deviner les propriétés de ce qui vibre. C'est ce que fait Fresnel et, se plaçant à ce nouveau point de vue, ce sont toutes les découvertes faites depuis peu en optique qu'il va coordonner. Coup sur coup, il trouve l'explication des belles colorations que produisent les divers corps cristallisés en lumière polarisée, donnant une théorie simple là où Biot et la théorie de l'émission avaient échoué. Il s'attaque ensuite au phénomène de la double réfraction, c'est-à-dire au problème de la propagation dans les cristaux. Toute une science, l'optique cristallographique, devait sortir de ces études, ainsi que toute une technique, l'examen des roches par leurs propriétés optiques. Deux Mémoires sont envoyés par Fresnel à l'Académie, tous deux relatifs à la double réfraction, l'un en 1821, l'autre en 1822. Les découvertes se succèdent si rapidement que, parfois, l'auteur n'a pas le temps de donner à ses calculs toute la rigueur voulue ; c'est ainsi qu'ayant défini la surface d'onde dans le cas le plus général, il devine, plutôt qu'il ne la démontre, l'équation de cette surface, et ce n'est qu'en 1828 qu'Ampère mène à bien le calcul complet et retrouve par une voie rigoureuse le résultat deviné par Fresnel.

Même les adversaires de la nouvelle théorie rendirent hommage à l'importance de l'œuvre ainsi développée. Le plus illustre de tous, Laplace, se fit honneur à lui-même en exprimant, à propos du second Mémoire de Fresnel sur la double réfraction, son admiration pour une œuvre qui avait comme première conséquence de rejeter dans l'ombre un travail, auquel il attachait une grande importance, où il avait essayé de rattacher la double réfraction à la théorie newtonienne qui lui était chère. Peu de temps après (12 mai 1823), Fresnel était désigné, par le vote unanime de l'Académie, comme membre de la section de physique, où il succédait à Charles.

RÉFLEXION ET RÉFRACTION Presque en même temps, il achevait son dernier grand Mémoire sur l'optique, consacré à l'étude de la réflexion et de la réfraction de la lumière polarisée. Avec le minimum d'hypothèses sur le mystérieux éther, il arrive à deviner les formules qui, dans tous les cas, permettent de calculer les intensités des rayons réfléchis et réfractés. Plus tard, par de tout autres méthodes, ces formules ont été retrouvées et confrontées avec l'expérience ; elles ont été toujours trouvées exactes lorsqu'est réalisée la condition explicitement posée au début, celle d'un passage brusque de l'un à l'autre milieu.

LES PHARES A partir de ce moment, la santé de Fresnel, déjà très ébranlée, ne lui permet aucun travail en dehors de ses occupations professionnelles. En 1819, l'administration des ponts et chaussées avait enfin compris qu'elle avait un meilleur parti à tirer d'un ingénieur qui renouvelait la science de l'optique et, sur les instances d'Arago, il fut adjoint à la Commission des phares, où son trop court passage devait amener d'importants résultats. Il essaya plusieurs fois de se faire une autre carrière ou de trouver, dans des occupations conformes à ses goûts, un léger supplément à son modeste traitement d'ingénieur ordinaire. Dans l'hiver de 1819 à 1820, il fit à l'Athénée un cours de physique, mais ne se trouva pas de dispositions à l'enseignement suffisantes pour continuer. En 1821, il accepta les fonctions pénibles et assez mal rétribuées d'examineur temporaire des élèves à l'École polytechnique ; il les conserva jusqu'en 1824, époque à laquelle sa santé le contraignit d'y renoncer. Il avait vainement essayé d'échanger ces fonctions contre celles, plus lucratives, d'examineur à l'École navale. Arago a raconté comment cette place lui fut refusée pour raison politique ; l'homme qui avait perdu sa place d'ingénieur pour être allé se joindre à l'armée du duc d'Angoulême ne fut pas jugé assez dévoué au gouvernement royal pour obtenir un modeste emploi pour lequel le désignaient son savoir et sa haute conscience !

Les dernières années de son existence furent entièrement employées au perfectionnement des phares, auxquels il donna, quant à leur partie optique, la forme qu'on leur a conservée presque sans modification.

Au commencement de 1827, il demanda et obtint de se faire soulager par son frère Léonor, qui allait devenir son successeur. Quatre mois après, il mourait à Ville-d'Avray à l'âge de trente-neuf ans.

CONSÉQUENCES DE L'ŒUVRE DE FRESNEL Dans l'œuvre de Fresnel, tout est digne d'admiration. Peut-on dire que tout soit définitif ? Non, évidemment. Une œuvre serait stérile qui ne pourrait être l'occasion d'aucun progrès ultérieur,

et il est bien rare qu'un progrès ne réagisse pas sur ce que l'on croyait définitivement acquis. Nous sommes moins affirmatifs que ne l'était Fresnel sur les propriétés élastiques de l'éther, qu'il avait d'ailleurs très sagement laissées un peu dans l'ombre. La théorie électro-magnétique, à la fois plus précise et moins ambitieuse que la théorie du milieu élastique, doit être aujourd'hui considérée comme une certitude et non comme une hypothèse, et Fresnel ne pouvait en prévoir l'avènement ; mais les travaux de Maxwell auraient été impossibles sans ceux de Fresnel, et personne n'a proclamé mieux que le grand physicien anglais la gloire du fondateur de la théorie des ondes.

Ce n'est pas seulement dans le domaine de l'optique que l'œuvre de Fresnel allait retentir. L'idée de la possibilité d'ondes transversales ouvrit une voie nouvelle aux études sur l'élasticité, si bien que les travaux de tous les physiciens mathématiciens du dix-neuvième siècle, ceux de Green en Angleterre, ceux de Cauchy et de Lamé en France, sont inspirés par l'œuvre de Fresnel.

VII

LA CRISTALLOGRAPHIE

LES CRISTAUX OBJETS DE CURIOSITÉ Nous avons vu déjà quels services l'étude des cristaux a rendus à la physique, particulièrement à l'optique ; la découverte fortuite de la double réfraction dans le « cristal d'Islande » a conduit Huygens à ses mémorables découvertes sur les ondes lumineuses, et une bonne partie des découvertes faites en optique au début du dix-neuvième siècle ont été la conséquence du mouvement de curiosité orienté, depuis le milieu du dix-huitième, vers les cristaux naturels.

Cette curiosité eut une autre conséquence fort importante : la fondation de la science des cristaux étudiés en eux-mêmes, ou cristallographie, fondation qui devait avoir, jusque dans la physique de ces dernières années, les plus importantes répercussions.

A ses débuts, la science des cristaux, purement descriptive, est confondue avec l'étude des « pierres figurées » de toute espèce ; le mot *fossile* désigne indistinctement les restes pétrifiés des animaux ou les cristaux naturels ; bien souvent, les cailloux roulés de forme sphérique sont décrits avec les formes cristallines, qui

affectent des formes de polyèdre, sans que l'on fasse la distinction capitale entre la forme accidentelle, purement extérieure des uns et la forme naturelle des autres, liée aux propriétés mêmes de la matière qui les constitue. L'histoire de ces débuts de la science des cristaux, qui empiète sur le dix-huitième siècle, n'appartient pas à l'histoire de la physique ; on y trouve les plus étranges opinions sur la formation de ces formes curieuses, et l'on voit, une fois de plus, combien le développement de la science était gêné par l'état misérable où se trouvait encore la chimie. Les cristaux se formant fréquemment au sein de l'eau et étant transparents comme l'eau, on trouve fréquemment exprimée cette idée que les cristaux sont uniquement composés par de l'eau solidifiée, comme la glace !

C **CLASSIFICATION DES COLLEC-** Vers le milieu du dix-huitième siècle, il devient
TIONS DE MINÉRAUX à la mode d'avoir un cabinet d'histoire naturelle, contenant la plus grande variété d'objets naturels curieux, rares ou jolis ; avec beaucoup d'autres choses, il s'y trouvait des cristaux naturels. Le désir de les classer fut l'occasion de l'examen, sans idées préconçues, de ces différents objets. Les confusions entre cristaux, d'une part, restes pétrifiés d'animaux ou cailloux usés, de l'autre, ne résiste pas un instant à cet examen, et la science des cristaux trouve les limites de son domaine. Plusieurs des collectionneurs de cette époque font classer ces collections par des spécialistes et en font publier, parfois d'une manière luxueuse, le catalogue descriptif.

E **XAMEN DE LA FORME EXTÉ-** L'un des fondateurs de la cristallographie,
RIEURE. ROMÉ DE L'ISLE Romé de Lisle, était un de ces classificateurs de collections ; aux environs de 1770, il publie les descriptions de plusieurs d'entre elles, accompagnées chacune de considérations générales sur les minéraux et sur leurs formes cristallines. Ce travail lui avait donné l'occasion d'examiner un très grand nombre d'échantillons ; il ne s'était pas contenté de les examiner, il avait, le premier, effectué des mesures, et il avait eu la perspicacité de s'attaquer dès le début à l'élément important, la mesure des angles dièdres. Il avait fait construire pour cela un appareil très simple, le goniomètre d'application, formé de deux branches articulées comme celles d'un compas, que l'on appliquait sur les faces du cristal et dont on mesurait l'angle sur un petit cercle divisé. Sa *Minéralogie* parut, pour la première fois, en 1772, et eut sa seconde édition en 1783. Avec un très grand nombre de faits particuliers relatifs aux divers minéraux, on y trouve la première loi de la cristallographie : la constance des angles de faces dans les



LES BALLONS. — ASCENSION DE CHARLES ET ROBERT AUX TUILERIES
(1^{er} Décembre 1783).

divers échantillons d'une même espèce. La grandeur des diverses faces, les longueurs des arêtes, sont affaire de hasard, mais les angles restent les mêmes. En dehors de son importance propre (elle marquait le début de la géométrie des formes cristallines), cette loi introduisait en cristallographie cette idée fondamentale que la chose importante est la considération des *orientations* dans la masse cristalline.

Bien qu'il ait, le premier, fait des mesures sur les cristaux, Romé de Lisle était resté un classificateur ; son but était, avant tout, de trouver les caractères distinctifs des diverses espèces, et c'est pour cela qu'il prend en considération la forme extérieure des cristaux ; mais l'idée ne lui vint pas d'essayer de rattacher cette forme aux propriétés mêmes de la matière qui constitue le cristal. Romé est plus *naturaliste* que *physicien*. Il a cependant ouvert la voie à Haüy, le véritable fondateur de la cristallographie moderne.

L ES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES
DES CRISTAUX. — HAÜY

Né en 1743 à Saint-Just, bourg du département de l'Oise, l'abbé Haüy était le fils d'un tisserand, et le frère aîné du célèbre philanthrope Valentin Haüy qui consacra sa vie à l'éducation des aveugles. Le futur fondateur de la cristallographie commença par s'intéresser à la grammaire ; il fut régent de la classe de cinquième au collège du Cardinal-Lemoine, où il était le collègue et l'ami du grammairien Lhomond. Par délassement, il se mit à suivre les nombreux cours de sciences naturelles qui existaient alors à Paris, et parmi eux, ceux que Romé de Lisle professait sur la minéralogie. La curiosité était alors très vive, à Paris, pour les cristaux ; ces objets naturels étaient décrits en détail dans plusieurs *dictionnaires* qui étaient entre toutes les mains. Dans les années autour de 1780 les journaux scientifiques,

Né en 1743 à Saint-Just, bourg du département de l'Oise, l'abbé Haüy était le fils d'un tisserand, et le frère aîné du célèbre philanthrope Valentin Haüy qui consacra sa



RENÉ-JUST HAÜY
(D'après un dessin de Boilly).

et en particulier le *Journal de physique*, alors dirigé par le naturaliste Lamétherie, contiennent de nombreux mémoires sur des faits particuliers. Beaucoup, il est vrai, sont sans intérêt, encombrés d'idées fausses, orientés même du côté opposé à celui où est la lumière. Lamétherie, par exemple, est convaincu que l'étude de la cristallisation rejoindra l'étude des êtres vivants ; encore en 1778 il écrit : « Nous n'avons pas craint de dire que la reproduction des êtres organisés, des végétaux et des animaux, est également une véritable cristallisation ». Ces publications avaient, du moins, l'avantage de maintenir la discussion ouverte, et, sans elles, Haüy, qui cherchait sa voie, n'aurait sans doute pas songé à s'occuper des cristaux. Du premier coup, il s'oriente dans la bonne direction, vers la physique et non vers la biologie. En brisant un cristal, on retrouve des fragments qui reproduisent tous la même forme ; Haüy en déduit que la forme cristalline révèle une propriété relative à la constitution des dernières particules de la matière cristallisée ; il imagine le cristal formé d'un empilement de « molécules constituantes », toutes pareilles, dont il cherche à deviner la forme d'après les diverses formes extérieures possibles. En développant cette théorie, il est conduit à des lois que vérifie l'observation : l'une permet de prévoir les diverses faces planes possibles dans une espèce cristalline ; l'autre conduit à la considération des *éléments de symétrie*, d'où naîtra la classification des *systèmes cristallins*.

Les idées de Haüy sont ébauchées dans son *Essai sur la structure des cristaux* publié en 1783, puis dans son *Exposition abrégée de la structure des cristaux* (1793), dans son *Traité de minéralogie* (1801) et enfin dans son *Traité de cristallographie* (1822). D'abord mal comprises par les contemporains, vivement critiquées par Romé de Lisle lui-même qui pensait toujours à la classification, les idées de Haüy ne tardèrent pas à soulever l'admiration universelle.

Depuis 1794, Haüy était conservateur du *Cabinet des mines*. En 1802, il devint professeur de minéralogie au Muséum, puis professeur à la Faculté des sciences en 1809. Haüy ne fut pas seulement un minéralogiste ; son esprit clair embrassait toute la physique. Nous avons déjà signalé sa participation aux expériences qui conduisirent à la création du système métrique ; collaborateur de Lavoisier, il avait eu le courage de le défendre, et la douleur de ne pouvoir le sauver. En 1803, il publia un *Traité élémentaire de physique*, écrit, dit-on, à la demande de Bonaparte, livre qui eut plusieurs éditions. Il mourut en 1822, après avoir été privé par la Restauration de presque tous ses moyens d'existence.

Les découvertes de Haüy en cristallographie ont dépassé de beaucoup les limites de cette science ; elles ont introduit en physique l'idée de milieu *non isotrope*, c'est-

à-dire dont les propriétés ne sont pas les mêmes dans les différentes directions. Ce sont ces idées qui, bientôt après, ont guidé Fresnel dans l'étude des propriétés optiques des cristaux, où les travaux de Huygens n'avaient été qu'un brillant début. Quant à la théorie de l'empilement des molécules polyédriques, se juxtaposant comme des briques qui forment un pilier, c'était une étape nécessaire pour arriver aux lois de la cristallographie ; nous verrons que, vers 1850, Bravais lui substitua une hypothèse beaucoup plus simple et plus générale, celle du réseau réticulaire, qui a reçu de nos jours la plus brillante confirmation lorsque l'on a pu trouver, dans l'emploi des rayons X, un outil assez délicat pour pénétrer la structure intime de la matière cristallisée.

VIII

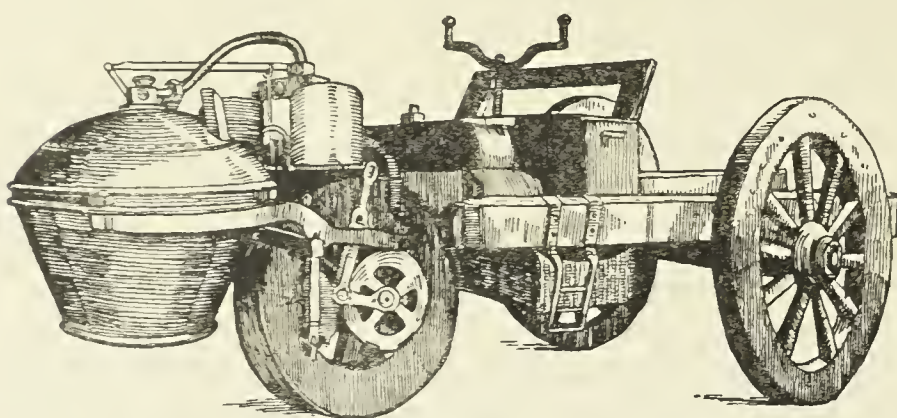
LES APPLICATIONS

L'INGÉNIEUR Les applications de la science étaient plus vieilles que la science elle-même ; jusqu'au seuil de la période que nous étudions, elles avaient peu modifié les conditions matérielles de l'existence et avaient peu attiré l'attention. C'est maintenant que le rôle de l'*ingénieur*, de l'homme qui résout rationnellement des problèmes dont la solution présente quelque utilité, commence à se faire sentir. Nous avons déjà dit comment cette influence s'est montrée dans des domaines déjà connus depuis longtemps, comme l'hydraulique et l'art de la navigation ; à la fin du dix-huitième siècle, commencent à se révéler des applications auxquelles personne n'avait osé sérieusement penser.

LA MACHINE A VAPEUR. SES PREMIÈRES APPLICATIONS. Après les belles tentatives de Papin, c'est surtout en Angleterre, le pays du charbon, que la machine à vapeur avait été perfectionnée. La première étape avait conduit Newcomen, vers 1715, à la construction de la *pompe à feu*, uniquement destinée à élever l'eau, et bientôt adoptée en Angleterre comme pompe d'épuisement des mines ; la seconde fut parcourue par Watt, qui, d'abord, apporta à la pompe à feu des perfectionnements décisifs (vers 1770), puis fit de la machine à vapeur le véritable moteur universel, apte à toutes les applications, et tout d'abord pouvant actionner les manufactures. Cet important perfectionnement était à peu près ter-

miné vers 1785, et les applications se développèrent rapidement en Angleterre. La construction de la machine à vapeur resta pendant assez longtemps le monopole de ce dernier pays ; ce n'est qu'en 1824 que les premières machines utilisables dans l'industrie furent construites en France.

L'une des premières applications y fut faite par les frères Péricr, qui fondèrent la « Compagnie des eaux » chargée de la première distribution d'eau dans Paris ; l'eau de la Seine était élevée au moyen d'une pompe à feu, construite en Angleterre dans les ateliers de Watt et Boulton, et installée à Chaillot. La machine com-



VOITURE A VAPEUR DE L'INGÉNIEUR MILITAIRE CUGNOT (1770)
(Conservatoire des Arts et Métiers).

gnie donnèrent lieu à de vives polémiques, auxquelles prirent part Beaumarchais et Mirabeau. Les affaires ne furent pas brillantes ; en 1788, la Ville fut obligée de prendre l'exploitation à sa charge, à des conditions onéreuses. L'initiative des frères Péricr, qui avait

provoqué à Paris un vif mouvement de curiosité, avait eu du moins ce résultat de faire connaître en France la grande invention de Watt.

Déjà avant cette époque, des tentatives intéressantes, peut-être prématurées, avaient été faites en France pour l'application de la machine à feu au problème des transports, application beaucoup plus difficile que celles de la machine fixe. Un ingénieur militaire, Joseph Cugnot, né en Lorraine et connu par divers ouvrages sur l'art des fortifications, vint en France après avoir vécu en Hollande et en Allemagne ; en 1769 il réussit à construire une voiture à vapeur qu'il destinait à la traction des canons. Essayée en présence de Choiseul, alors ministre de la Guerre, et du général Gribeauval, inspecteur général de l'artillerie, la machine, chargée de quatre personnes, put se déplacer avec une vitesse de 4 kilomètres à l'heure ; mais la chaudière était insuffisante et après un quart d'heure de marche il fallait un arrêt d'égale durée pour la remettre en pression. Sur l'ordre de Choiseul, une nouvelle voiture fut construite à l'arsenal de Paris. La machine avait deux cylindres, où la vapeur agissait par sa pression et non par condensation. La construction était achevée

en 1771 ; presque aussitôt, Choiseul était disgracié, et personne ne s'intéressa plus à l'invention de Cugnot ; on ne sait même pas si la machine fut essayée. Elle était encore sous un hangar à l'arsenal à l'époque de la Révolution ; on en reparla à diverses reprises, on fit des rapports favorables, mais rien de plus. Cugnot, qui avait reçu du gouvernement royal une pension de 600 livres supprimée par la Révolution, obtint du Premier Consul le rétablissement de sa pension, portée à 1 000 francs ; il mourut en 1804. Vers la même époque, sa voiture fut transportée au Conservatoire des Arts et Métiers où elle est encore, comme un ancêtre curieux de la voiture automobile actuelle, destiné à une application qui n'est devenue habituelle que pendant la dernière guerre.

A la même époque commençait à se poser le problème de la navigation à vapeur et, là aussi, nous trouvons un précurseur qui poussa très loin la solution du problème. Dès 1776, le marquis de Jouffroy, gentilhomme franc-comtois, réussit à construire le premier bateau à vapeur qui ait réellement navigué par ses propres moyens. Muni d'une machine à vapeur construite avec l'aide d'un chaudronnier de Baumeles-Dames, long de treize mètres, ce bateau sans voiles ni rameurs navigua pendant deux mois sur le Doubs. Un peu plus tard, Jouffroy réussit à faire construire sur la Saône, à Lyon, un navire de plus grande dimension (il avait quarante-trois mètres de long) dont l'essai fut fait en 1783 devant des milliers de personnes. Ce succès n'eut pas de lendemain. Jouffroy, ruiné, dut plus tard accepter, comme ancien capitaine d'infanterie, un lit aux Invalides, où il mourut, oublié, en 1832. On sait que c'est d'Amérique que l'invention des bateaux à vapeur devait nous revenir ; Fulton connaissait fort bien les expériences de Jouffroy et il rendit toujours hommage aux travaux de son devancier. C'est en France que Fulton fit une grande partie de ses premières expériences ; mais le Premier Consul, qui aimait les idées immédiatement réalisables, comme s'il avait senti que l'avenir ne lui appartenait pas, lui fit le plus mauvais accueil, et Fulton quitta définitivement notre pays.

Ce n'est qu'au début de la période suivante, vers le premier quart du dix-neuvième siècle, au moment où les applications étaient déjà nombreuses et où l'on voyait poindre l'invention des chemins de fer, que les hommes de science et non plus seulement les inventeurs commencèrent, chez nous, à s'intéresser vraiment à la machine à vapeur. C'est alors que commencèrent les travaux de Dulong et Arago, et aussi les magnifiques réflexions philosophiques de Sadi Carnot.

LES AÉROSTATS · Nos contemporains ont connu bien des découvertes dont l'annonce a soulevé un vif mouvement de curiosité, mêlée d'abord d'incrédulité et ensuite d'admiration ; aucune de ces découvertes n'a soulevé

autant d'admiration et de surprise que n'en a produit chez nos pères, en 1783, l'annonce de l'invention des aérostats. On trouvait bien, dans de vieux auteurs, la trace de réflexions sur la possibilité de s'élever dans les airs, mais ces projets informes ne pouvaient que détourner de telles recherches tous les physiciens sérieux. Tout à coup, on apprit que deux inconnus, les frères de Montgolfier, avaient résolu le problème.

Les deux frères étaient les fils d'un grand industriel d'Annonay, dont la fabrique de papier était célèbre dans toute l'Europe. L'aîné, Joseph-Michel, né en 1740, n'eut d'abord d'autre maître que ceux du collège d'Annonay, qui le regardaient comme un médiocre écolier ; plus tard, il put venir à Paris, après quelques années de travaux solitaires sur les sciences physiques, et se mettre en rapport avec plusieurs des savants de son époque. Le second, Étienne, né en 1745, avait fait d'excellentes études au collège de Sainte-Barbe, à Paris, et, se destinant à la carrière d'architecte, avait été l'élève de Soufflot. Il s'était lié avec quelques-uns des savants de cette brillante époque, particulièrement avec Monge, et avec Meusnier qui devait si vivement s'intéresser à son invention quelques années plus tard. Rappelés tous deux à Annonay, les deux frères allaient mettre en commun leurs idées et leurs rêves ; dans leur collaboration étroite, il semble que Joseph représentait l'intuition, et Étienne la science réfléchie. On a fait beaucoup d'hypothèses sur les circonstances en partie fortuites qui auraient conduit les deux frères à leur grande invention ; ils étaient probablement assez savants pour prévoir qu'une enveloppe remplie d'un gaz plus léger que l'air pourrait s'élever dans l'atmosphère ; ils auraient, dit-on, essayé d'abord de remplir un sac en papier d'« air inflammable » (gaz hydrogène) dont la remarquable légèreté venait d'être découverte, mais ils n'auraient pas réussi à cause de la porosité de l'enveloppe. Quoi qu'il en soit, c'est en employant de l'air chaud qu'ils allaient réussir. Leurs premiers succès datent de 1782 ; l'expérience fut répétée avec des appareils de plus en plus grands ; l'année suivante elle fut pour la première fois faite en public avec un grand succès. Le ballon, fait de toile d'emballage doublée de papier, avait douze mètres de diamètre et pesait cinq cents livres ; il fut gonflé avec de l'air chaud, en présence de l'Assemblée des États particuliers du Vivarais, qui était alors réunie à Annonay, le 5 juin 1783. Le ballon s'éleva, disent les assistants, à une hauteur de mille toises et vint tomber à une distance de sept mille pieds de son point de départ. Un procès-verbal de l'expérience fut signé par les députés aux États et envoyé immédiatement à l'Académie des sciences de Paris.

L'annonce de cette expérience souleva tout de suite une vive curiosité. Sans

perdre un instant, l'Académie décida de prier MM. de Montgolfier de venir à Paris pour la répéter aux frais de l'Académie. Sans attendre leur arrivée, un élève de Buffon, Faujas de Saint-Fond, adjoint naturaliste au jardin des Plantes, ouvrit une souscription pour faire la même expérience, sur laquelle on ne savait presque rien. En quelques jours, il réunit dix mille francs ; on chargea de la réalisation l'habile physicien Charles et les frères Robert qui avaient trouvé un procédé pour rendre, au moyen d'un vernis au caoutchouc, les étoffes imperméables.

Les indications données par les inventeurs dans leur récit étaient très vagues ; aucune indication précise n'était donnée sur le gaz qui remplissait le ballon. Charles était bien l'homme qui convenait pour résoudre rapidement le problème qui lui était posé. Il ne s'était fait connaître par aucune découverte importante, mais son *cabinet de physique* passait pour l'un des plus beaux d'Europe ; ses cours de physique expérimentale, comme jadis ceux de l'abbé Nollet, avaient un grand succès, surtout à cause du soin qu'il mettait à répéter d'une manière brillante toutes les expériences qu'il pouvait connaître. La technique de la physique expérimentale, telle qu'on pouvait la pratiquer de son temps, n'avait pas de secret pour lui. Charles eut immédiatement l'idée de gonfler une enveloppe avec du gaz hydrogène. En moins de vingt-cinq jours, un globe de soie vernie, ayant douze pieds de diamètre, fut construit et, comme essai, gonflé d'air dans la cour de la maison habitée par les frères Robert sur la place des Victoires, où la foule se pressait pour le contempler. Il fallut ensuite le gonfler d'hydrogène, après avoir improvisé l'appareil nécessaire pour obtenir les quarante mètres cubes de gaz que devait contenir le ballon. L'opération du gonflement dura quatre jours ; l'affluence du public autour de l'atelier de Robert était telle que la force armée dut intervenir pour maintenir la foule.

Le départ devait avoir lieu du Champ de Mars. Le 27 août 1783, à deux heures du matin, pour éviter l'encombrement des rues, l'énorme globe fut transporté à travers Paris, à la lumière des torches, et placé dans la petite enceinte préparée pour le recevoir. Au milieu d'une foule immense évaluée à trois cent mille personnes qui couvrait jusqu'aux coteaux de Passy, le départ eut lieu à un signal donné par un coup de canon, et le ballon s'éleva en quelques minutes jusqu'à un millier de mètres. Trop gonflé au départ et complètement fermé, il éclata et alla tomber à Gonesse, à quatre lieues de son point de départ.

Cependant, sur l'invitation de l'Académie, Étienne de Montgolfier était arrivé à Paris pour répéter l'expérience d'Annonay. Un instant découragé par le succès de l'expérience de Charles, il se mit à l'œuvre pour la construction d'un grand ballon à air chaud, aidé par son ami Réveillon, le fabricant de papiers du faubourg

Saint-Antoine. Après un premier essai chez Réveillon, un grand ballon à peu près sphérique, de près de dix mètres de hauteur, fut construit pour être lancé à Versailles en présence du roi et de la cour. L'expérience eut lieu le 19 septembre, au milieu d'une foule immense accourue de Paris. Elle eut un plein succès ; au ballon on avait attaché un panier contenant un mouton, un coq et un canard, qui atterrirent sans accident dans les bois de Vaucresson.

Presque immédiatement, le désir vint à bien des spectateurs de s'élever dans les airs. Montgolfier entreprit aussitôt de construire un appareil pouvant enlever un homme ; il avait environ vingt mètres de hauteur, et l'homme qui le montait pouvait entretenir du feu sous l'orifice pour maintenir la force ascensionnelle. Dès le 15 octobre, Pilatre du Rozier s'élevait avec le ballon retenu par des cordes. L'ascension libre était encore jugée trop dangereuse ; Montgolfier désirait qu'une plus longue expérience le rendît maître de son invention ; le roi s'opposait à ce qu'un de ses sujets s'exposât à un pareil danger. Louis XVI finit par se laisser fléchir ; le 21 novembre 1783, Pilatre du Rozier et le marquis d'Arlandes, partis du parc de la Muette en présence du Dauphin et de sa suite, s'élèvent dans les airs. Le ballon vient planer au-dessus de Paris où la foule se précipite, pour le voir, dans tous les endroits découverts. A plusieurs reprises, le feu que l'on entretenait sous l'orifice du ballon faillit se communiquer à l'enveloppe, mais le sang-froid des nouveaux aéronautes empêcha tout accident. Ayant traversé tout Paris, les aéronautes cessèrent d'alimenter le feu, vinrent atterrir à la Butte aux Cailles, et purent ramener leur ballon, après l'avoir plié, à l'atelier du faubourg Saint-Antoine.

Une sorte de rivalité s'était établie entre Charles et Montgolfier ; chacun à son tour devait passer au premier plan de l'actualité. Une nouvelle souscription produisit dix mille francs pour la construction d'un ballon à hydrogène pouvant porter deux voyageurs. Il s'agissait de tout autre chose que du globe sans passager qui avait été lancé le 27 août ; le nouvel aérostat allait avoir neuf mètres de diamètre, et sa construction soulevait une foule de problèmes qui ne s'étaient jamais posés. Charles les résolut avec une remarquable habileté ; en quelques semaines, il imagina et fit construire la nacelle en osier qui devait porter les voyageurs, le filet qui la soutient, le lest qui permet de régler l'ascension, la soupape qui permet de provoquer la descente. L'enveloppe légère et imperméable avait déjà fait ses preuves dans l'expérience du mois d'août ; elle fut composée de fuseaux alternativement rouges et jaunes ; la nacelle était en forme de char. En peu de semaines, le ballon sphérique, presque tel qu'il est encore employé, avait été créé et muni de ses principaux accessoires, y compris le baromètre destiné à la mesure de l'altitude. Ce résultat remarquable,

dû à la science du physicien qui le réalisa, montre aussi combien l'industrie était développée à cette époque dans notre pays, et quelle était l'habileté de nos artisans.

L'expérience eut lieu le 1^{er} décembre 1783, par une journée magnifique, au milieu de la grande allée des Tuileries. Les contemporains affirment qu'elle eut quatre cent mille spectateurs. Après une magnifique ascension de deux heures, l'aérostat atterrit à Nesle près de l'Isle-Adam, à neuf lieues de Paris ; il avait emporté deux passagers, Charles et l'un des frères Robert. Charles voulut alors reprendre seul l'ascension pour s'élever plus haut ; il déposa son compagnon et monta seul jusqu'à quatre mille mètres. Ce second voyage ne dura qu'une demi-heure, et conduisit l'aéronaute à deux lieues de son second point de départ. L'aérostation était fondée ; moins de six mois s'étaient écoulés depuis la première expérience publique d'Annonay.

Les espoirs soulevés par la nouvelle invention étaient immenses ; personne ne doutait que l'on ne pût bientôt naviguer dans l'atmosphère comme sur les océans ; il fallut plus d'un siècle avant que ces espoirs fussent en partie réalisés. Mais dans le premier mouvement d'enthousiasme, des idées très remarquables furent mises au jour et plusieurs d'entre elles devaient largement contribuer aux progrès futurs.

Le surlendemain de l'ascension de Charles, Meusnier, lieutenant du génie, lit à l'Académie des sciences un *Mémoire sur l'équilibre des machines aérostatiques, sur les différents moyens de les faire monter et descendre, et spécialement sur celui d'exécuter ces manœuvres sans jeter de lest et sans perdre d'air inflammable...* Ce Mémoire est l'une des œuvres les plus remarquables qui aient été écrites sur l'aérostation, et plusieurs des idées qu'il contient devaient trouver, beaucoup plus tard, leur application dans la technique du ballon dirigeable.

Meusnier de Laplace, né à Tours en 1734, était, lui aussi, un officier du génie, ancien élève de l'École de Mézières où Monge, qui resta en étroites relations d'amitié avec lui, avait été son professeur. Successivement ingénieur, administrateur, il se faisait connaître comme géomètre par des recherches, restées classiques, sur la courbure des surfaces. Il fut de ceux qu'enthousiasmèrent l'invention des aérostats, et l'un des premiers à réfléchir aux moyens de les perfectionner ; les recherches classiques qu'il entreprit avec Lavoisier pour rendre indubitable la composition de l'eau eurent comme point de départ le désir qu'avait Meusnier de trouver un procédé de préparation de l'hydrogène moins coûteux que celui employé par Charles ; la décomposition de l'eau par le fer chauffé au rouge, donna le moyen cherché. Meusnier était lieutenant-colonel du génie en 1789, lorsque la Révolution donna un autre aliment à son activité. Comme son ami Monge, comme la plupart

des hommes de science, quelle que fût leur origine, il embrassa avec ardeur les idées nouvelles. Maréchal de camp depuis 1792, il fut envoyé par son ami Carnot, comme lui ancien élève de Mézières, à l'armée du Rhin, sous les ordres de Custine, et chargé de défendre Mayence contre l'armée prussienne. Il s'y révéla bon général et vaillant soldat, et fut tué le 5 juin 1793.

Ses deux Mémoires de 1783 et de 1784 contiennent plusieurs des inventions qui devaient rendre possible la navigation aérienne. L'une des plus remarquables est l'invention du « ballonnet » placé à l'intérieur du ballon, que l'on peut remplir d'air afin de maintenir gonflée l'enveloppe principale. Les conditions d'équilibre de l'aérostat, les manœuvres à faire pour obtenir la montée et la descente, Meusnier analyse tout d'une manière si complète qu'il n'y a rien, de nos jours, à changer à sa théorie. Il se préoccupe aussi des moyens que l'on pourrait employer pour propulser le ballon à travers l'atmosphère, pour en faire, comme l'on devait dire plus tard, un « dirigeable » ; il propose comme organe propulseur l'hélice dont l'emploi était encore à peine connu en navigation. Sur un seul point, il commet une erreur d'appréciation : il pense que cette hélice pourrait être manœuvrée à bras d'hommes, se faisant illusion sur la puissance mécanique nécessaire à la propulsion. En réalité, le problème de la propulsion était alors insoluble, et ne put être abordé avec succès qu'un siècle plus tard par un autre officier du génie, le colonel Renard. Encore fallut-il attendre le perfectionnement du moteur à explosion pour que la solution devienne réellement utilisable.

Les idées de Meusnier restèrent à l'état de projet, et les vastes espoirs qu'avait fait naître l'invention des frères Montgolfier ne tardèrent pas à presque s'évanouir pour longtemps. Sans sortir de la période des origines, les applications immédiates de l'aérostation se réduisirent à ceci : quelques ascensions faites par des curieux, amateurs d'un sport nouveau et non sans danger ; une utilisation militaire, brillante et glorieuse mais de courte durée ; quelques ascensions faites dans un but scientifique.

LE SPORT AÉROSTATIQUE Après les succès de 1783, la mode était aux ballons ; gravures, faïences, éventails de cette époque nous montrent quel était le mouvement de curiosité vers la nouvelle invention. Les ascensions se succédèrent rapidement, à Paris, dans les principales villes de province, puis dans les autres pays. Elles n'ajoutèrent rien à ce que l'on savait ; c'était simplement, comme nous dirions aujourd'hui, du sport. Ce n'est pas ici le lieu d'en raconter en détail l'histoire ; le sport aéronautique eut cependant cet intérêt qu'il entretenait la curiosité publique, empêcha les expériences de tomber dans l'oubli, et prépara

des hommes pour les applications futures. Au début, les amateurs se partagèrent entre le ballon à feu, bientôt appelé *montgolfière*, et le ballon à hydrogène, moins dangereux mais plus coûteux ; ce n'est que beaucoup plus tard que l'usage du gaz d'éclairage fit oublier le ballon à feu.

Parmi les succès du début, il faut citer la première traversée de la Manche accomplie le 7 janvier 1785 entre Douvres et Calais par Blanchard, accompagné de l'Américain Jeffries. Peu de temps après, l'aérostation faisait ses premières victimes : en voulant, à leur tour, traverser la Manche, Pilatre du Rozier et Romain se tuaient le 15 juin 1785.

LES APPLICATIONS MILITAIRES L'idée que les ballons pourraient être employés par les armées comme moyen d'information dut venir à bien des spectateurs des expériences de Montgolfier et de Charles ; l'occasion allait bientôt s'offrir de mettre cette idée en pratique.

C'est au chimiste Guyton de Morveau, qui avait déjà fait une ascension, à Dijon, en 1784, que l'on en dut la réalisation. Devenu député à la Convention, il proposa au Comité de salut public d'utiliser les aérostats aux armées ; sa proposition fut accueillie et l'on se mit immédiatement à l'œuvre. Coutelle, connu comme Charles par son cabinet de physique, fut chargé de réaliser l'idée ; après quelques essais satisfaisants, il fut nommé directeur des expériences aérostatiques et installé dans le jardin du petit château de Meudon ; il choisit comme second un jeune homme versé comme lui dans l'art des expériences, Jacques Conté, pour qui Monge avait une haute estime. En quelques semaines, toute la technique du ballon captif était créée, y compris les appareils nécessaires à la production sur place du gaz hydrogène pour le procédé qu'avait imaginé Meusnier. La première « compagnie d'aérosters », dont Coutelle était le capitaine, fut envoyée à Maubeuge d'où on transporta le ballon, tout gonflé, à Charleroi : les renseignements que communiquèrent les aérosters furent de la plus grande importance et contribuèrent à la victoire de l'armée française à Fleurus (26 juin 1794).

A la suite de cette expérience décisive, une seconde compagnie fut créée et confiée à Conté ; l'aérostation rendit encore de bons services pendant la campagne de 1795. Un peu plus tard, Conté fut désigné pour faire partie de l'expédition d'Égypte, et obtint de Bonaparte la permission d'emporter son matériel et d'emmener sa compagnie ; malheureusement, le navire qui portait le matériel fut coulé par les Anglais. A son retour d'Égypte, Bonaparte jugea que l'aérostation serait pour l'armée un luxe inutile ; il licencia les compagnies, fit fermer l'école de Meudon et vendre aux

enchères le matériel. Il fallut attendre jusqu'à la guerre de sécession américaine et au siège de Paris pour retrouver des applications militaires des ballons, et c'est seulement dans la dernière guerre que l'armée de l'air a eu un rôle vraiment important.

LES ASCENSIONS SCIENTIFIQUES Les premières ascensions faites dans un but de recherche scientifique ne donnèrent, il faut bien le dire, que des résultats assez maigres ; on ne put guère que confirmer ce que l'on savait déjà par déduction sur la constitution de l'atmosphère. L'abaissement de température avec l'altitude croissante, la constance de la composition de l'air, étaient des faits que les expériences en montagne avaient déjà permis de découvrir. L'étude du magnétisme terrestre présentait plus d'intérêt ; on pouvait se demander si l'action de la Terre sur l'aiguille aimantée était liée au voisinage du sol, et si cette action ne subirait pas une forte diminution si l'on pouvait expérimenter à une grande hauteur. La question fut élucidée à la suite de deux ascensions, la première faite le 20 août 1804 par Biot et Gay-Lussac et la seconde le 16 septembre de la même année par Gay-Lussac seul. Cette dernière ascension fut poussée jusqu'à sept mille mètres, altitude que l'homme ne devait pas dépasser avant longtemps. De l'air, rapporté de cette haute région, se trouva avoir exactement la même composition que celui que nous respirons ; l'aiguille aimantée se comporta aussi comme au niveau du sol. Quant aux observations sur le thermomètre et sur le vent déduit de la marche du ballon, la météorologie était encore trop peu avancée pour que l'on pût en tirer un réel profit.

LA TÉLÉGRAPHIE OPTIQUE Cette invention, elle aussi, souleva un grand enthousiasme, tiré plutôt des circonstances historiques où elle se produisit que de son intérêt scientifique. Bien qu'elle n'ait pas eu d'influence sur le progrès scientifique, on ne peut se dispenser d'en dire ici quelques mots.

Les communications à distance au moyen de signaux avaient été, sans aucun doute, employées parfois dans l'antiquité ; l'idée d'utiliser régulièrement des signaux, observés au moyen de lunettes, était déjà venue au dix-septième siècle. Dès 1690, Amontons y avait pensé et avait fait à ce sujet des essais qui eurent un certain retentissement. Une expérience fut faite au Luxembourg en présence du Dauphin ; l'idée n'eut aucune suite.

Elle ne fut reprise que pendant la Révolution ; les circonstances attirèrent alors sur elle la curiosité publique.

Claude Chappe appartenait à une famille du Maine où les sciences étaient en

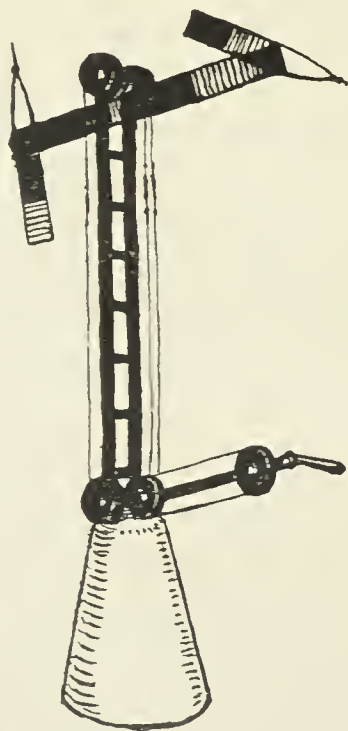
honneur ; il était le neveu de l'abbé Chappe, membre de l'Académie des sciences, qui était mort en Californie où il était allé observer le passage de Vénus en 1769. Claude avait déjà publié quelques mémoires sur l'électricité lorsque survint la Révolution. Retiré dans son pays natal, il y fit avec ses frères les premiers essais de communication à distance au moyen de bras articulés qui, par leurs diverses positions, constituaient un alphabet. Une première expérience publique eut lieu le 2 mars 1791. Un des frères de Claude Chappe, ayant été élu député à l'Assemblée législative, fit connaître son invention à Paris ; le 22 mars 1792, Claude put la présenter à l'Assemblée. Il avait déjà pu faire quelques expériences autour de Paris avec un appareil, presque identique à l'appareil définitif, construit par le célèbre horloger Breguet. A la Convention nationale, la cause de la nouvelle invention fut prise en main par Lakanal, président du Comité d'Instruction publique, qui vit l'importance de l'invention de Chappe pour la conduite des opérations militaires et pour la lutte contre le mouvement fédéraliste. Chappe reçut le titre d'*ingénieur télégraphe*, avec la solde de lieutenant du génie (5 livres 10 sols par jour). On décida de créer immédiatement deux lignes, formées de postes échelonnés dont chacun communiquait avec le suivant, espacés de quinze kilomètres environ ; l'une de ces lignes devait relier Paris avec Lille, l'autre avec Landau. La ligne Paris-Lille avait seize stations ; elle fut établie en moins d'un an, et les frais d'installation furent très minimes ; elle était prête à fonctionner à la fin d'août 1794. Le poste de départ était sur le toit du palais du Louvre ; il communiquait avec un poste placé sur la butte Montmartre. Le 1^{er} septembre, à la séance de la Convention, est apportée une dépêche qui annonce la reprise de Condé sur les Autrichiens ; l'Assemblée répond par le télégraphe que Condé s'appellera Nord-Libre et que l'armée du Nord a bien mérité de la patrie. La réponse à ce message arrive avant la fin de la séance.

Malgré ce succès, le développement fut lent. C'est seulement en l'an VI que l'on réalisa la ligne projetée vers l'Est ; elle fut exécutée en cinq mois, pour que le Directoire pût suivre les délibérations du Congrès de Rastadt.

Napoléon s'intéressa peu à la télégraphe optique ; cependant, en 1813, il décida brusquement que la ligne de l'Est serait prolongée jusqu'à Mayence, et ce prolongement fut exécuté en deux mois ; il ne resta pas longtemps en service.

La Restauration et surtout le gouvernement de Louis-Philippe donnèrent une grande extension au réseau de télégraphie optique, qui resta exclusivement réservé au service de l'État. En 1844, il y avait 5 000 kilomètres de lignes jalonnées de cinq cent trente-quatre stations, reliant avec Paris vingt-neuf villes. Tout un personnel de télégraphistes, dirigés par un corps d'ingénieurs, assurait le service, qui n'avait

d'équivalent dans aucun pays du monde. Mais déjà la télégraphie électrique avait fait ses preuves dans d'autres contrées. Chez nous, l'administration de la télégraphie optique, fière de son avance sur les autres pays, chercha d'abord à se défendre contre la nouvelle invention, préconisée devant la Chambre des députés par Arago dès 1842. Il fallut bientôt se rendre à l'évidence et, à partir de 1846, les pittoresques postes de télégraphie aérienne durent successivement disparaître devant le fil électrique. Ce n'est qu'en 1851 que le public français fut admis à utiliser le télégraphe. Cependant, l'appareil de Chappe connu encore quelques jours glorieux ; il rendit des services dans la guerre de Crimée ; en Algérie, la sécurité n'étant pas suffisante pour que l'on pût établir des poteaux et des fils, il subsista jusqu'en 1854.





CHAPITRE V

LA PARTIE MOYENNE DU DIX-NEUVIÈME SIÈCLE

(1825-1890)

I. La fondation de la thermodynamique. L'œuvre de Sadi Carnot. — II. Les propriétés des fluides. Gaz et vapeur. Dulong et Arago. Pouillet. Amagat. — III. La physico-chimie. Les dissolutions. Osmose. — IV. Élasticité et vibrations. Acoustique. V. L'électricité. Les mesures électriques. — VI. Les unités. Le système métrique devient international. — VII. L'optique après Fresnel. Les applications des interférences lumineuses. Spectroscopie. Foucault et le perfectionnement des instruments. — VIII. Les propriétés des cristaux. La théorie moléculaire des cristaux. Bravais. — IX. Les applications. Le grand développement de la machine à vapeur. Les chemins de fer. Le moteur à explosion. Les grandes constructions métalliques. L'électricité et le télégraphe. Le téléphone. Les applications de l'électricité; transport de l'énergie. L'aéronautique. L'industrie du froid. La photographie.

I

LA FONDATION DE LA THERMODYNAMIQUE



La mécanique avait depuis longtemps trouvé sa forme définitive, les phénomènes calorifiques avaient déjà donné lieu à de très importantes études, et le lien qui unit les deux espèces de phénomènes n'était pas encore découvert; la science qui devait prendre un si magnifique développement sous le nom de thermodynamique, qui devait servir de base commune à toutes les sciences de la nature, n'était pas encore soupçonnée.

Et cependant le fait le plus simple de cette science, la production de chaleur par frottement, sans aucune dépense de corps matériel, ou, comme nous disons aujourd'hui, par simple dépense de travail mécanique, ce phénomène si facile à observer n'était pas ignoré ; il est d'une observation si banale qu'il est impossible de mettre un nom sur sa découverte. Les fondateurs de la dynamique n'ignoraient certainement pas ce phénomène, mais ils ne s'en occupaient pas, tout simplement parce qu'ils le regardaient comme étant en dehors du sujet de leurs études. Le dégagement de chaleur par frottement est souvent cité par les physiciens du dix-huitième siècle, mais il est bien curieux de constater qu'aucun d'eux n'en avait fait l'objet de mesures précises. Parfois, on trouve des tentatives d'explications, le plus souvent empruntées à la théorie matérialiste du « calorique », et ces explications sont d'une étrangeté déconcertante. De loin en loin, une lueur de vérité apparaît, mais on retombe bientôt dans l'obscurité. Nous avons signalé, au chapitre précédent, un exemple remarquable d'une telle lueur, lorsque Laplace tire de la chaleur dégagée par le frottement un argument contre la matérialité du calorique et pour ce que l'on a appelé de nos jours la « théorie mécanique » de la chaleur. Un peu plus tard, l'Anglais Rumford appela l'attention sur l'énorme quantité de chaleur que peut dégager le frottement, phénomène que tous les artisans connaissaient, et qui prenait plus d'ampleur avec le développement de certaines industries. Rumford fit à ce sujet quelques remarques très judicieuses qui méritent de le faire ranger parmi les précurseurs de la thermodynamique, mais ces remarques passèrent inaperçues et n'exercèrent aucune influence sur les contemporains.

VITESSE DU SON INFLUENCÉE PAR LES PHÉNOMÈNES THERMIQUES

Il s'était cependant déjà présenté un problème de dynamique où l'oubli des phénomènes calorifiques avait empêché de trouver la solution exacte ; c'est le problème de la propagation du son dans l'air. Le mécanicien qui étudie le mouvement d'un corps peut, à la rigueur, fermer systématiquement les yeux sur le dégagement de chaleur qui se produit ; cette chaleur ne modifie pas les lois du mouvement, et l'effet calorifique ne réagit pas sur le phénomène mécanique. Il en est tout autrement lorsqu'un mouvement vibratoire se propage dans l'air ; à chaque compression qu'il subit, le gaz s'échauffe pour se refroidir lorsqu'il se détend ; or, ces changements de température modifient profondément les propriétés élastiques du fluide, propriétés qui conditionnent la propagation de l'ébranlement. Dès 1687, Newton avait soumis au calcul la propagation du son dans l'air, et avait trouvé, pour la vitesse de propagation, un nombre qui, transformé dans notre système d'unités, donne environ deux

cent quatre-vingt-dix mètres par seconde ; l'expérience donnait une valeur sensiblement plus élevée. Pendant près d'un siècle, le désaccord entre le résultat du calcul et celui de l'expérience resta une sorte de scandale scientifique ; les expériences faites soit pour mesurer plus exactement la vitesse du son, soit pour obtenir avec plus de précision les données qui servent de base au calcul ne firent que rendre plus certain le désaccord. Dans les tentatives infructueuses pour en trouver la cause, on rencontre les plus grands noms de la science au dix-huitième siècle ; Lagrange, Euler ne purent formuler que des explications inacceptables.

C'est Laplace qui, dans les premières années du dix-neuvième siècle, résolut cette troublante difficulté, en indiquant que l'on avait oublié de tenir compte du changement de température produit par la compression de l'air. Ce phénomène était connu depuis longtemps, mais il n'avait jamais été l'objet de mesures précises ; Laplace vit dans ce changement de température la cause de l'erreur de Newton. Si, en effet, l'air s'échauffe au moment où il se comprime, son élasticité en est modifiée, et la loi de compressibilité admise par Newton est inexacte ; implicitement, on avait supposé la température invariable, et cette hypothèse était fausse. Laplace ne paraît pas avoir trouvé immédiatement le moyen de mettre en équations cet aperçu ; il en parlait souvent, mais les propriétés des gaz n'étaient pas encore assez bien connues pour que l'on pût trouver la formule exacte. Poisson fit faire un grand pas à la question en introduisant les deux chaleurs spécifiques de l'air, et en donnant la loi exacte de compressibilité lorsque la compression a lieu à température variable, sans échange de chaleur. Les raisonnements de Poisson sont, il est vrai, assez confus ; il faisait de la thermodynamique sans le savoir, et avant la découverte des principes qui régissent cette science ; les résultats sont cependant exacts et les notions introduites très importantes. Très peu de temps après (1816), Laplace put reprendre son idée, et donner la formule correcte pour calculer la vitesse du son. Il manquait une donnée pour achever le calcul ; on ne connaissait pas le rapport des deux chaleurs spécifiques de l'air. Ce nombre fut bientôt déterminé (1819) par Clément et Desormes ; la formule de Laplace donna alors, pour la vitesse du son dans l'air, un résultat parfaitement conforme au résultat de l'expérience. Ce succès avait attiré de nouveau l'attention sur cette vitesse, déjà bien des fois mesurée ; en 1822, on jugea utile de faire une nouvelle détermination, sans changer en rien la méthode employée par les académiciens de 1738, mais en apportant plus de soin dans l'élimination des petites causes d'erreur. L'expérience fut faite aux environs de Paris, entre Villejuif et Montlhéry ; Laplace avait été l'instigateur de l'expérience, et les observateurs furent Prony,

Bouvard, Mathieu et Arago. Le résultat est le plus exact qui ait été obtenu jusqu'aux expériences de Regnault.

Un véritable scandale scientifique venait ainsi de prendre fin ; en même temps, on avait pris sur le fait et soumis au calcul un exemple remarquable de liaison entre phénomène mécanique et phénomène calorifique. On aurait pu s'attendre, après cette alerte et ce succès, à ce que les mécaniciens prissent intérêt à l'ensemble des phénomènes calorifiques qui accompagnent les transformations mécaniques. Il n'en fut rien et à l'admiration que soulève en nous la découverte de Laplace et de Poisson se joint l'étonnement de constater que ces grands mathématiciens ont passé à côté du premier principe de la thermodynamique. Probablement, tout les invitait à ne pas s'y arrêter, et d'abord le langage employé, qui, plus souvent que nous ne le croyons, conduit nos pensées. Le mot de calorique revient constamment sous leur plume, même sous celle de Laplace qui avait eu de si beaux aperçus sur la chaleur et le mouvement ; ce mot n'était pas fait pour pousser aux méditations sur la production de chaleur par dépense de travail mécanique. Cependant, l'œuvre ne fut pas perdue ; c'est le problème de la vitesse du son qui avait attiré l'attention sur la détente des gaz ; c'est des données acquises à ce propos que trente ans plus tard le physiologiste allemand Mayer devait tirer la première valeur de l'équivalent mécanique de la chaleur.

L'ENTRÉE EN SCÈNE DES INGÉNIEURS Pour le moment, le progrès allait venir d'un autre côté ; ce sont des réflexions d'ingénieurs sur le fonctionnement de la machine à vapeur qui devaient aboutir à des idées neuves et complètement inattendues.

Il était impossible que le développement du machinisme n'appelât pas l'attention sur les rapports entre chaleur et travail. Les mathématiciens pouvaient fermer volontairement les yeux sur la chaleur dégagée dans les mouvements qu'ils étudiaient ; les ingénieurs ne pouvaient pas ignorer que les « machines à feu » élevaient de l'eau, montaient des fardeaux, en un mot produisaient du travail mécanique au moyen de phénomènes thermiques. Ce fut la gloire de Sadi Carnot de réfléchir le premier à la philosophie de cette transformation, de s'abstraire de toute considération particulière, et d'arriver du premier coup à la plus cachée des deux grandes lois de la thermodynamique.

L'ŒUVRE DE SADI CARNOT Il était le fils aîné du grand Carnot et naquit en 1796 au palais du Luxembourg, que son père habitait comme membre du Directoire. Son frère, Hippolyte Carnot, qui a écrit l'histoire de sa vie, raconte que

le jeune Sadi Carnot manifesta de très bonne heure le plus vif intérêt pour les arts mécaniques. Il entra en 1812 à l'École polytechnique, et prit part, avec ses camarades, à la défense de Paris en 1814, pendant que son père défendait Anvers. Nommé officier du génie, il alla à Metz suivre les cours de l'École d'application. Mais bientôt, après le retour des Bourbons, son père est proscrit et le jeune officier est envoyé successivement dans plusieurs places fortes pour y remplir des fonctions médiocres. Il obtint, en 1819, d'être mis en disponibilité et mena pendant plusieurs années une vie consacrée tout entière à l'étude et à la réflexion ; c'est pendant cette période que se place sa grande découverte, qu'il publia en 1824 sous ce titre : *Réflexions sur la puissance motrice du feu et les machines propres à développer cette puissance*. Au lieu de présenter son ouvrage à quelque société savante ou de le publier dans un recueil scientifique, il avait préféré faire imprimer à ses frais, sous forme d'une brochure d'une centaine de pages, le fruit de ses méditations, et cette circonstance explique en partie que, de son temps, son œuvre ait été fort peu connue. On sait bien peu de choses sur les lectures qui



SADI CARNOT A L'ÂGE DE 17 ANS
(D'après un portrait de Boilly, 1813).

ont pu lui suggérer ses idées ; on sait seulement que, pendant ses quelques années de loisir, il suivait des cours au Collège de France, à la Sorbonne, à l'École des mines, qu'il visitait des usines et s'intéressait à toutes les branches du savoir humain. De 1826 à 1828, il reprit du service dans l'armée puis donna définitivement sa démission. La révolution de 1830 souleva en lui de grandes espérances, bientôt déçues ; il se remit alors au travail, et paraît avoir commencé des recherches

sur les propriétés des gaz, sujet étroitement lié avec celui de son précédent ouvrage ; mais il ne put rien terminer. Déjà gravement malade, il fut enlevé le 24 août 1832 par une attaque de choléra ; il n'avait que trente-six ans.

C'est donc dans l'unique brochure intitulée *Réflexions sur la puissance motrice du feu* que tient toute l'œuvre de Sadi Carnot ; elle suffit à rendre son nom immortel, car elle contient le germe d'une nouvelle science et une nouvelle manière de raisonner sur les phénomènes de la nature.

On voit, dès la première page, que des réflexions sur l'art de l'ingénieur, mais d'ingénieur doué d'un esprit hautement généralisateur, ont guidé l'auteur. Le rôle qu'allait prendre la machine à vapeur est vivement mis en lumière : « L'étude de ces machines est du plus haut intérêt, leur importance est immense, leur emploi s'accroît tous les jours ; elles paraissent destinées à produire une grande révolution dans le monde civilisé. » Il reste cependant beaucoup à faire pour en perfectionner la théorie qui a été prise d'une manière trop étroite. « Malgré les travaux de tous genres entrepris sur les machines à feu, malgré l'état satisfaisant où elles sont aujourd'hui parvenues, leur théorie est fort peu avancée, et les essais d'amélioration tentés sur elles sont encore dirigés presque au hasard...

« Pour envisager dans toute sa généralité le principe de la production du mouvement par la chaleur, il faut le concevoir indépendamment d'aucun mécanisme, d'aucun agent particulier ; il faut établir des raisonnements applicables, non seulement aux machines à vapeur, mais à toute machine à feu imaginable, quelle que soit la substance mise en œuvre et quelle que soit la manière dont on agisse sur elle. » On ne saurait mieux caractériser la forme de raisonnements qu'emploie la thermodynamique. Sadi Carnot met ensuite en évidence la nécessité d'un transport de chaleur de la chaudière au condenseur ; aucune machine à feu ne pourrait fonctionner si l'on ne disposait pas de *deux* températures différentes. La série des transformations du corps actif (l'eau et la vapeur dans les machines ordinaires) est ensuite étudiée ; elle ramène le fluide à son état initial, et constitue ce qui sera appelé plus tard un *cycle*. Seul, le mot est postérieur à Carnot ; l'idée est entièrement de lui. Il arrive enfin à cet énoncé célèbre : « La puissance motrice de la chaleur est indépendante des agents mis en œuvre pour la réaliser ; sa quantité est fixée uniquement par les températures des corps entre lesquels se fait, en dernier résultat, le transport du calorique. »

Ainsi, on peut remplacer la vapeur d'eau par un fluide quelconque, même par un gaz, par les corps ayant les propriétés les plus diverses, on n'augmentera pas pour

cela la « puissance motrice de la chaleur » ; le résultat est plus général que les propriétés de tous les corps ; il exprime une grande loi naturelle.

Carnot voit tout de suite que cette grande loi impose des conditions que doivent remplir les propriétés de tous les corps. Malheureusement, les données connues de son temps sur les propriétés des fluides ne lui permettent d'examiner qu'un petit nombre de cas particuliers. Il arrive cependant, pour les gaz, à l'une des formules les plus remarquables de la théorie de ces fluides : « La différence entre la chaleur spécifique sous pression constante et la chaleur spécifique sous volume constant est la même pour tous les gaz. » Nous voyons ici reparaître ces deux « chaleurs spécifiques », introduites par Poisson à propos de la propagation du son ; nous voyons aussi, pour la première fois, l'affirmation d'une relation numérique entre les propriétés d'un corps, découverte comme conséquence d'un principe très général. Sur la vapeur d'eau, Carnot ne peut faire que des vérifications approchées, faute de données d'expérience suffisantes ; dans la mesure où les données sont exactes, les vérifications restent satisfaisantes. Carnot revient enfin, dans les dernières pages de son livre, aux conditions réelles de fonctionnement des machines à vapeur existant à son époque et, avec une sûreté d'appréciation admirable, montre qu'elles sont encore susceptibles de grands perfectionnements au point de vue de la consommation de combustible. Ce sont les préoccupations de l'ingénieur qui clôturent l'œuvre comme elles l'avaient commencée.

Et tout cela est antérieur de vingt ans à ce que nous appelons le « principe de l'équivalence », d'après lequel on peut produire de la chaleur en dépensant une quantité « équivalente de travail » et qui, inversement, exige que la production de travail dans la machine à feu soit accompagnée de la disparition, de l'anéantissement d'une quantité équivalente de chaleur. Carnot emploie toujours le langage de la théorie du « calorique », en parle comme d'un objet matériel. Voici un exemple : « Le calorique, développé dans le foyer par l'effet de la combustion, traverse les parois de la chaudière, vient donner naissance à la vapeur, s'y incorpore en quelque sorte. Celle-ci, l'entraînant avec elle, le porte d'abord dans le cylindre, et de là dans le condenseur... L'eau froide du condenseur s'empare donc, en dernier résultat, du calorique développé par la combustion... La vapeur n'est ici qu'un moyen de transport du calorique... »

Le calorique est bien regardé comme indestructible, et c'est presque un miracle que cette manière de voir n'ait pas conduit Carnot à quelque contradiction. Nous verrons plus loin que, vers la fin de sa vie, Carnot avait enfin découvert la vérité et avait vu nettement la non-matérialité de la chaleur et sa

transformation en travail ; mais il n'eut pas le temps d'approfondir cette seconde découverte.

DIFFUSION LENTE DE L'ŒUVRE DE CARNOT. — CLAPEYRON La brochure de Carnot n'avait été tirée qu'à un très petit nombre d'exemplaires ; il s'en fallut de peu que son œuvre ne fût complètement perdue. Elle fut sauvée de l'oubli par un autre ingénieur, Clapeyron, qui l'avait comprise et en tira des conséquences qui ne pouvaient manquer d'attirer l'attention.

Entré à l'École polytechnique en 1816, Clapeyron était encore élève à l'École des mines lorsqu'en 1820, le gouvernement russe, voulant fonder une école des voies et communications, en demanda les premiers maîtres à la France. On désigna deux jeunes gens, plus riches de science que de pratique, Lamé et Clapeyron, qui tous deux devaient tenir une grande place dans la science de leur temps. Lamé devint un des successeurs de Poisson et de Fourier en physique mathématique, et enseigna pendant longtemps la physique à l'École polytechnique ; Clapeyron allait contribuer largement à la fondation de la thermodynamique. Les deux jeunes ingénieurs restèrent onze ans en Russie. La Révolution de 1830, en excitant la méfiance du gouvernement russe pour un régime nouveau qui n'était pourtant pas bien révolutionnaire, les obligea à revenir en France. Pendant leur séjour, ils avaient, en commun, envoyé à Paris un important Mémoire sur la théorie de l'équilibre des voûtes. De retour dans leur pays, ils trouvèrent tous deux un emploi dans la construction des premiers chemins de fer ; c'est probablement ce qui orienta les études de Clapeyron vers la machine à vapeur. Trois ans après, en 1834, il publiait dans le *Journal de l'École polytechnique* son célèbre *Mémoire sur la puissance motrice du feu*. Le titre était presque le même que celui de l'ouvrage de Carnot ; c'en était un développement, presque un commentaire. Mais là où Carnot n'avait fait qu'indiquer (d'ailleurs avec une admirable clarté) les idées générales, Clapeyron précise, développe, éclaire par des représentations graphiques encore en usage aujourd'hui, découvre de nouvelles conséquences relatives aux propriétés des vapeurs.

C'est par ce commentaire que l'œuvre de Carnot fut connue, et qu'elle put porter ses fruits. En France, son importance ne fut pas immédiatement comprise, et il fallut assez longtemps pour que Carnot fût mis au rang qu'il méritait parmi les grands physiciens. Heureusement, il se trouva à l'étranger deux hommes de génie qui comprirent son œuvre et la développèrent en lui rendant pleinement hommage : l'un est l'Anglais William Thomson, l'autre l'Allemand Clausius.

W. Thomson, plus tard lord Kelvin, une des gloires de la science anglaise, un

des hommes qui ont le plus complètement personnifié la physique moderne, à la fois mathématique et expérimentale, aimait à se proclamer le disciple de l'école française du commencement du dix-neuvième siècle. Ses premières admirations sont pour la théorie de la chaleur de Fourier, « admirable poème mathématique » comme il aimait à dire plus tard ; son premier voyage est pour visiter Paris en 1845 ; l'accueil qu'il y reçoit est toujours resté dans sa mémoire, et c'est Regnault, bon maître en la matière, qui l'initie aux difficultés de l'expérimentation précise. Ayant lu le *Mémoire* de Clapeyron il désirait connaître celui de Carnot ; il a raconté plus tard d'une manière plaisante les difficultés qu'il eut à se procurer à Paris l'opuscule de cet auteur, dont le nom était si difficile à prononcer pour un Anglais. Il le découvre enfin, et la lecture le remplit d'admiration. En 1851, il publie son grand *Mémoire* sur la chaleur.

Clausius, moins complet, est surtout un mathématicien ; il développe brillamment l'œuvre de Carnot, et en tire la notion si importante d'entropie. Il ne sera pas hors de propos de rappeler ici que Clausius mérite d'être connu pour une autre raison ; après la guerre de 1870, il reçut du gouvernement français la croix de la Légion d'honneur pour le dévouement avec lequel il s'était employé à adoucir les souffrances des soldats français prisonniers dans son pays.

PRODUCTION DE CHALEUR
PAR DÉPENSE DE TRAVAIL

Cependant, entre l'œuvre de Carnot et de Clapeyron et celle de leurs continuateurs une découverte importante s'était enfin produite : on avait reconnu clairement les transformations réciproques de la chaleur et du travail.

Plusieurs fois, avons-nous dit, on avait passé bien près de cette grande découverte ; on avait même énoncé la grande loi de l'équivalence, mais il semblait que l'on s'obstinât à ne pas la voir. On la trouve dans les écrits de Rumford. En 1800, Montgolfier l'énonce sous une forme un peu confuse. Quelques-unes des rares notes manuscrites laissées par Sadi Carnot montrent qu'à la fin de sa vie, il était arrivé, mais sans avoir le temps de la publier, à la découverte complète du principe de l'équivalence. Dans une de ces notes il dit : « D'après quelques idées que je me suis formées sur la théorie de la chaleur, la production d'une unité de puissance motrice nécessite la destruction de 2,70 unités de chaleur. » Ainsi Carnot était arrivé à une valeur de « l'équivalent mécanique de la chaleur ». Transformé dans notre manière habituelle de compter, cela correspond à 370 kilogrammètres pour une calorie, et ce nombre n'est pas très éloigné de la vérité. Comment Carnot était-il arrivé à ce résultat ? Certainement pas par des expériences directes ; il n'avait pas le moyen de les faire. C'était, très

probablement, en partant des propriétés des gaz, auxquelles il avait beaucoup réfléchi, c'est-à-dire par la méthode même que Mayer devait employer plus tard. Le résultat n'était qu'approché parce que les données que l'on avait alors n'étaient pas non plus très exactes.

Dans une autre note, Carnot pense évidemment à la transformation inverse du travail en chaleur : « Expériences à faire sur la chaleur et la puissance motrice. Répéter l'expérience de Rumford sur le forage d'un métal dans l'eau, mais mesurer la puissance motrice consommée en même temps que la chaleur produite. Mêmes expériences sur plusieurs métaux et sur le bois... Frapper un morceau de plomb en plusieurs sens, mesurer la puissance consommée et la chaleur produite, etc... » C'est presque tout le programme des expériences que devaient réaliser Joule et ses successeurs.

Enfin, l'idée de la matérialité du calorique, jusqu'à ce mot qui, comme un fantôme, avait arrêté si longtemps le progrès de la physique, l'a complètement abandonné, car il écrit : « La chaleur n'est autre chose que la puissance motrice, ou plutôt que le mouvement qui a changé de forme. C'est un mouvement dans les particules des corps. Partout où il y a destruction de puissance motrice, il y a, en même temps, production de chaleur en quantité précisément proportionnelle à la quantité de puissance motrice détruite. Réciproquement, partout où il y a destruction de chaleur, il y a production de puissance motrice. »

Cette fois, l'énoncé était clair et complet ; il ne fut pas publié. Un peu plus tard, en 1839, le principe de l'équivalence était encore une fois découvert, et cette fois publié, mais passait encore inaperçu. Marc Seguin, neveu des Montgolfier, avait été un des initiateurs des chemins de fer en France ; en 1827, il inventa la chaudière « à tubes de fumée », une des formes de la chaudière tubulaire, pour les locomotives du chemin de fer de Saint-Étienne à Lyon, la première voie ferrée qui ait été construite dans notre pays. Dans son livre sur *l'Influence des chemins de fer*, il arrive extrêmement près du principe de l'équivalence et donne tous les éléments pour calculer approximativement la valeur de l'équivalent mécanique de la calorie.

L'idée était dans l'air. En 1842, elle perça d'une manière définitive. L'Allemand Robert Mayer calcule une valeur sensiblement exacte de l'équivalent mécanique au moyen des chaleurs spécifiques de l'air ; presque en même temps, Joule, répétant les expériences de Rumford dans les conditions les plus variées, annonce la constance du rapport entre le travail dépensé et la chaleur produite, et donne la première valeur vraiment exacte de ce rapport ; l'ingénieur danois Colding arrive presque simultanément au même résultat. Cette fois, tout le monde dut s'incliner

devant l'évidence, et les fondateurs de la thermodynamique eurent à leur disposition les deux grands principes de cette science : celui qu'avait découvert Carnot et celui qui venait enfin d'être définitivement établi.

DÉVELOPPEMENT DE LA THERMODYNAMIQUE Au développement de cette science, les physiciens français contribuèrent surtout en fournissant des données exactes et sûres qui manquaient encore sur les propriétés élastiques et thermiques des fluides et plus tard sur la thermochimie. Quant au grand mouvement d'idées qui marqua les débuts de la thermodynamique, entre 1854 et 1870, notre pays n'y prit presque aucune part. Carnot et Clapeyron étaient oubliés chez nous ; leurs idées nous revinrent de l'étranger à travers W. Thomson, Helmholtz, Rankine et Clausius. L'époque du second Empire devait être, malgré quelques brillantes exceptions, une époque d'éclipse pour la physique française ; nos physiciens manquaient, pour la plupart, des idées générales et de la culture mathématique nécessaires pour comprendre la thermodynamique, et nos mathématiciens étaient occupés à d'autres travaux, peut-être plus urgents. Cependant, dans cette période peu brillante, Hirn, physicien et ingénieur de Mulhouse, fut un initiateur dans l'application de la nouvelle science à l'étude expérimentale de la machine à vapeur. Ses expériences, aux environs de 1860, sont les premières qui aient été faites sur des moteurs industriels ; elles confirmèrent les principes de la thermodynamique. Sa *Théorie mécanique de la chaleur*, dont la première édition est de 1862, fut le premier ouvrage français consacré à la nouvelle doctrine. A partir de ce moment, les ouvrages sur le même sujet se succèdent assez rapidement ; ils ne font guère qu'exposer, d'une manière plus ou moins heureuse, les idées venues ou revenues de l'étranger. La *Théorie mécanique de la chaleur* de Verdet est aussi de 1862, celle de Combes de 1863, celle de Briot de 1869. C'est en France que l'on fit le plus grand nombre d'objections, dont la plupart n'étaient que des incompréhensions, à ce que le monde entier appelait « le principe de Carnot ». Ce n'est qu'après 1870 que nous avons eu une véritable école de thermodynamistes, en grande partie sous l'influence de mathématiciens ; elle a compté des noms particulièrement illustres. Massieu, dès 1869, a introduit les fonctions caractéristiques, ouvrant la voie aux travaux de l'Américain W. Gibbs sur l'application de la thermodynamique aux équilibres chimiques. Moutier, utilisant les résultats expérimentaux du chimiste Sainte-Claire Deville, avait déjà, vers 1875, obtenu quelques résultats importants. Plus près de nous, Henri Poincaré, à qui aucune partie des sciences physico-mathématiques n'était étrangère, fit beaucoup pour l'exposé didactique de la ther-

modynamique et pour essayer d'établir le lien entre cette science et la dynamique classique. Pierre Duhem peut être considéré comme le champion intransigeant et impeccable de la thermodynamique, cette science qui, prenant comme point de départ quelques axiomes extrêmement généraux, comme l'impossibilité du mouvement perpétuel, arrive, de déduction en déduction, à trouver des relations précises entre les diverses propriétés d'un corps. Prenant, peut-être, le cadre pour le tableau lui-même, Duhem refuse obstinément d'introduire dans sa théorie la moindre parcelle d'hypothèse, même suggérée par les faits les plus évidents ; sa critique aiguë, son immense érudition n'en ont pas moins rendu d'importants services à la science.

II

LES PROPRIÉTÉS DES FLUIDES ; GAZ ET VAPEURS

DULONG ET ARAGO. La théorie avait marché plus vite que l'expérience ;
POUILLET la thermodynamique prévoyait des relations numériques entre des quantités qui n'étaient pas encore mesurées. Ce sont encore des considérations empruntées à l'art de l'ingénieur qui imposèrent la nécessité de perfectionner et développer beaucoup les données que l'on possédait sur les fluides.

Nous en sommes restés, au chapitre précédent, aux déterminations faites par Gay-Lussac par des méthodes ingénieuses, mais avec des moyens très modestes. Le développement de la machine à vapeur imposait bientôt la nécessité de mesures plus étendues. En 1825, l'Académie des sciences chargeait Dulong et Arago de faire des mesures de la tension de la vapeur d'eau jusqu'à des pressions beaucoup plus élevées que celles qui avaient été atteintes jusque-là ; une série d'accidents, produits par des chaudières, avait montré la nécessité d'avoir des données plus complètes sur les circonstances qui régissent le fonctionnement de ces appareils. Il fallait, ce qui était alors une grande nouveauté, un tube manométrique à mercure de vingt-cinq mètres de hauteur ; on l'installa dans la tour carrée enclavée dans les bâtiments du lycée Henri IV, seul reste de l'ancienne abbaye Sainte-Geneviève. Ce grand manomètre servit à graduer un manomètre plus commode, à air comprimé, ce qui permit en passant de constater que la loi de Mariotte était encore très approximativement valable jusqu'à des pressions de plus de trente atmosphères. Le grand manomètre devenant alors inutile, la suite des expériences fut faite dans une cour

de l'Observatoire, où l'on mesura les tensions de la vapeur d'eau jusqu'à environ 225 degrés.

Les mesures dans cette branche de la physique se succèdent rapidement, et chacune amène quelque progrès dans les méthodes. Pouillet fait un emploi systématique du pyromètre à air, et s'en sert pour les premières déterminations, encore bien imparfaites, de températures élevées. Professeur au collège Bourbon, à la Sorbonne, à l'École polytechnique, enfin directeur du Conservatoire des arts et métiers, il a laissé la réputation d'un excellent professeur, et a publié un traité de physique qui a été longtemps classique en France et à l'étranger. Despretz, qui fut son adjoint à la Sorbonne, fit aussi de nombreuses déterminations sur les propriétés des fluides ; on lui doit d'avoir le premier montré nettement les écarts que présente la compressibilité des gaz avec la loi de Mariotte, ainsi que de nombreuses mesures calorimétriques.

Tous ces efforts avaient été un peu dispersés, un peu isolés, et aucun résultat ne pouvait prétendre à une très grande précision. Chaque mesure supposait exacte quelque mesure antérieure sur laquelle on s'appuyait et qui était elle-même un peu incertaine ; la mesure même des températures qui était à la base de toutes ces déterminations, bien qu'ayant fait de réels progrès, ne présentait pas toutes les garanties de précision et de sécurité désirables. Le moment était venu de procéder à une révision complète en reprenant par la base toute l'étude des propriétés thermiques, élastiques et calorimétriques des fluides. Ce fut l'œuvre admirable du grand expérimentateur Regnault.



APPAREIL DE DULONG ET ARAGO POUR MESURER
LA FORCE ÉLASTIQUE DE LA VAPEUR

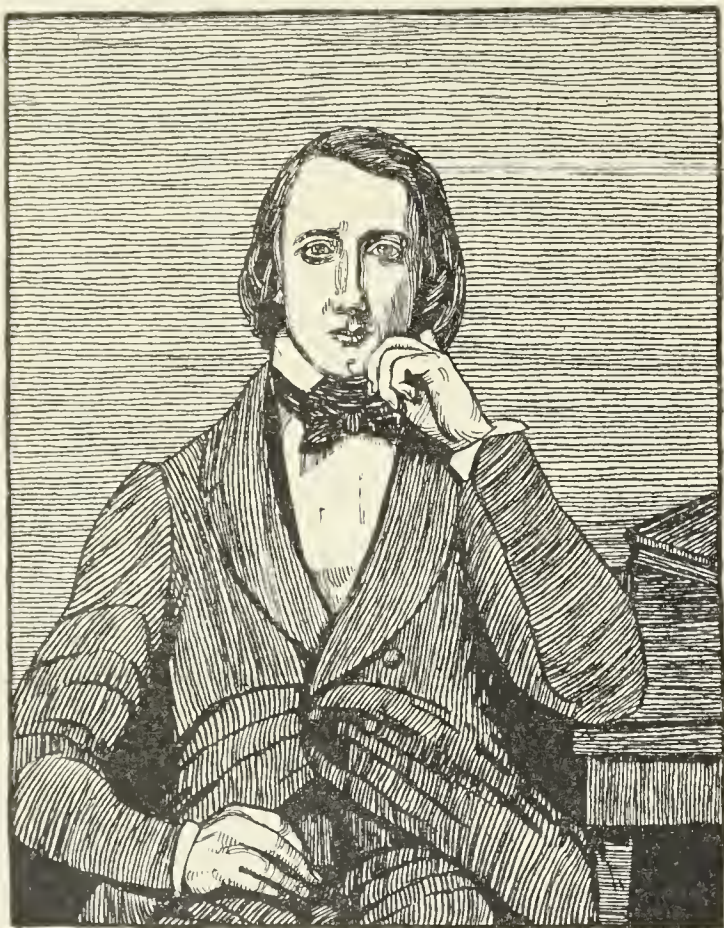
REGNAULT

Regnault avait commencé par orienter son activité vers la chimie. Né en 1810, il était entré à l'École polytechnique en 1830 et en sortit comme ingénieur des mines. A sa sortie de l'École d'application, il devint préparateur

de Gay-Lussac pour le cours de chimie de l'École polytechnique, et publia plusieurs mémoires sur des questions de chimie pure ; en 1840, il succéda à son maître dans la chaire de chimie, et fut bientôt après élu, comme chimiste, membre de l'Académie des sciences. Cependant, la chaire de physique du Collège de France devenait vacante par la mort de Savart, qui avait succédé à Ampère ; Regnault fut nommé (1841),

et, à partir de ce moment, tourna toute son activité vers l'étude des propriétés physiques des fluides.

L'origine de son travail fut la nécessité, sentie par les ingénieurs qui s'occupaient de la machine à vapeur, de reprendre avec plus de précision, de compléter et d'étendre les recherches de Dulong et Arago sur la vapeur d'eau. Regnault reçut pour cela du ministère des Travaux publics une subvention qui était d'autant plus nécessaire que les ressources de son laboratoire du Collège de France étaient presque nulles. Les pouvoirs publics n'avaient pas encore compris, à cette époque, qu'un laboratoire n'est pas une collection inerte d'instruments rangés comme dans un musée, que chaque nouvelle recherche exige une adaptation nouvelle des moyens, et que, si ingé-



REGNAULT

(D'après un portrait d'Amaury Duval).

nieux que soit un physicien, l'aide d'ouvriers habiles lui est nécessaire. Lorsque Regnault prit possession de son laboratoire, il avait, comme seule ressource, l'aide d'une femme qui était chargée de balayer son cabinet.

Les expériences furent relatées, à mesure qu'elles étaient achevées, dans divers recueils périodiques ; elles furent ensuite réunies en trois gros volumes ayant pour titres : *Relation des expériences entreprises par ordre du ministre des Travaux publics pour déterminer les principales lois et les données physiques nécessaires au calcul de la machine à vapeur.*

Le programme que s'était tracé Regnault était d'une ampleur extrême ; il s'agissait de reprendre toutes les données qui interviennent dans l'étude des propriétés des fluides, de manière à tout asseoir sur une base solide et à obtenir le maximum de précision. Il est presque incroyable que ce travail ait pu être accompli par un seul homme ; il y consacra plus de vingt années d'un labeur acharné. Tout le travail de plus d'un siècle de recherches est repris par lui ; tous les instruments de mesure sont examinés et perfectionnés. Mesure exacte des températures (c'est lui qui, le premier, fait des mesures vraiment précises avec le thermomètre à gaz), mesure des pressions, mesure des quantités de chaleur, pesées, mesures de volume, tout est repris depuis la base. Dilatation des liquides, compressibilité et dilatation des gaz, densités des gaz et des vapeurs, pressions des vapeurs, chaleurs spécifiques, toutes les constantes physiques sont mesurées avec une précision et une sûreté dont on était resté bien loin.

Cet énorme labeur ne fut pas sans danger. Dans l'une de ses expériences qui exigeait une ascension pénible pour la lecture d'un manomètre, Regnault fit une chute terrible et sa santé en fut pour toujours ébranlée. La guerre de 1870-71 fut pour lui une catastrophe personnelle. En 1854, il avait été nommé directeur de la manufacture nationale de porcelaine de Sèvres ; pendant le siège de Paris, ses papiers scientifiques, qui étaient à Sèvres, furent brûlés. Son fils, le grand peintre Henri Regnault, fut tué à Buzenval. Regnault, après ces épreuves, ne fut plus que l'ombre de lui-même, ; il abandonna tout travail, et mourut en 1878.

L'œuvre de Regnault n'a été dépassée en précision que dans les études faites sur un champ beaucoup plus limité au Bureau international des poids et mesures à partir de 1875. En étendue, elles ont été largement dépassées par les physiciens modernes, qui ont su pousser les pressions jusqu'à des milliers d'atmosphères et les températures presque jusqu'au zéro absolu d'un côté et de l'autre jusqu'à des milliers de degrés. Les expériences de Regnault n'en restent pas moins un modèle, et ses résultats ont été et sont encore la base de tous les calculs sur les propriétés élastiques des fluides. Chose curieuse, l'œuvre de Regnault a été appréciée avec encore plus d'admiration à l'étranger que dans son propre pays. En France, il a été de mode, pendant les années qui ont suivi la mort de Regnault, de parler de son œuvre avec quelque dédain, comme d'un travail de manœuvre qui aurait pu être fait par n'importe qui. C'est là une appréciation profondément injuste ; elle s'explique probablement par le zèle excessif et maladroit de quelques commentateurs. Toute une génération d'écoliers a été, cela est certain, profondément ennuyée par des détails d'appareils et des descriptions d'expériences dont ils n'avaient que faire, et qui

encombraient les médiocres manuels classiques écrits à la fin du dix-neuvième siècle. Il semblait, à les lire, que la manœuvre du robinet à trois voies ou les détails du collier à gorge fussent à eux seuls toute la physique, et la mauvaise humeur des élèves s'est reportée sur l'expérimentateur de génie qui n'y était pour rien. Il est certain, d'autre part, que Regnault ne fut ni un grand mathématicien ni un grand philosophe ; il a fourni toutes les données nécessaires pour asseoir la thermodynamique sur une base sûre ; personne n'a plus contribué que lui au progrès de cette admirable science, et cependant, il a pris lui-même peu d'intérêt aux raisonnements de si haute portée de la thermodynamique. Est-ce une raison pour rabaisser son mérite ? Aurait-il trouvé le temps de faire l'immense travail qu'il a accompli, travail qui était nécessaire et qu'aucun autre n'aurait pu faire, s'il avait dispersé son attention sur un plus grand nombre de sujets ?

Il était difficile de dépasser Regnault en précision ; il y avait à compléter ses expériences quant à l'étendue du domaine exploré, aussi bien dans le domaine des températures que dans celui des pressions ; ce fut l'œuvre des physiciens de la fin du dix-neuvième siècle.

LIQUÉFACTION DES GAZ

On savait déjà, depuis les recherches de Faraday (de 1823 à 1825), que la plupart des gaz peuvent être liquéfiés en les comprimant et les refroidissant. En France, Thilorier avait rendu un grand service en donnant le moyen de produire en grande quantité la neige carbonique, à une époque où la technique du froid et celle des hautes pressions étaient fort peu avancées. Il apparaissait dès lors qu'entre un gaz et une vapeur il n'y avait qu'une différence relative, tenant aux conditions particulières dans lesquelles nous nous trouvons pour les observer. Cependant, un certain nombre de gaz avaient résisté à toutes les tentatives de liquéfaction, et étaient encore désignés sous le nom de *gaz permanents*, comme s'ils faisaient exception à la règle commune. En 1869, le physicien anglais Andrews jeta un jour nouveau sur cette question, en introduisant la notion de « point critique », température au-dessus de laquelle il est impossible de liquéfier un gaz. Il devenait presque certain que, si un certain nombre de gaz apparaissaient comme permanents, cela tenait à ce que leur point critique était inférieur aux plus basses températures alors obtenues, qui n'étaient pas au-dessous de — 100 degrés. La liquéfaction de tous les gaz était liée au problème des grands froids.

Ce problème fut résolu d'une manière extrêmement élégante en 1878 par Cailletet, en utilisant le phénomène bien connu du refroidissement par la détente du gaz lui-même, préalablement comprimé à une pression de plusieurs centaines

d'atmosphères. Cailletet montra que l'on obtient ainsi un brouillard produit par la condensation en gouttelettes du gaz employé, même lorsque ce gaz est l'un de ceux que l'on regardait comme permanents. A la même époque, le problème de la liquéfaction des gaz était abordé par un physicien de Genève, Raoul Pictet, qui employait des moyens beaucoup plus puissants, mais dont les expériences n'étaient pas à l'abri de toute critique.

Dès ce moment, l'idée était trouvée, et la technique des très basses températures allait se développer rapidement en même temps que l'art de liquéfier les gaz. Cailletet n'avait aperçu que des gouttelettes fugitives de l'oxygène ou de l'azote liquéfiés ; très peu de temps après, Wroblewski, qui avait travaillé sous sa direction, obtenait ces liquides d'une manière stable, et un peu plus tard le physicien anglais Dewar préparait l'air liquéfié en grande quantité. La liquéfaction de l'hydrogène devait suivre bientôt et enfin celle de l'hélium qui donne le moyen d'approcher de bien près du « zéro absolu ». Aujourd'hui, c'est au magnifique laboratoire de l'Université de Leyde que sont concentrés les moyens, qui n'existent nulle part ailleurs, pour l'étude des très basses températures.

A MAGAT En même temps, la connaissance quantitative des propriétés des fluides suivait le mouvement résultant des progrès techniques. Regnault n'avait étudié ces propriétés que jusque vers trente atmosphères. Là encore, c'est Cailletet qui ouvrit la voie en poussant jusqu'à des pressions de deux cents atmosphères. Un peu plus tard, Amagat entreprit sa belle série de mesures sur les fluides soumis à de très hautes pressions. Avec des moyens à la fois très modestes et très ingénieux, il réussit à obtenir des pressions allant jusqu'à trois mille atmosphères, et à les mesurer avec une précision suffisante. Son œuvre, poursuivie pendant près de quarante ans, à partir de 1875, constitue actuellement encore la source la plus importante de renseignements sur les propriétés des fluides aux hautes pressions. Ce n'est que dans ces dernières années que quelques laboratoires américains ont pu, disposant de ressources qui nous font complètement défaut, atteindre des pressions encore plus élevées, et commencer l'étude de certaines propriétés de la matière jusqu'à des pressions atteignant dix mille atmosphères. Pour atteindre de pareils résultats, les moyens de fortune dont disposent la plupart de nos savants ne suffisent pas ; l'ingéniosité individuelle est désarmée, et ce n'est que par une véritable industrialisation du laboratoire que de nouveaux résultats peuvent être obtenus.

III

LA PHYSICO-CHIMIE

DÉBUTS DE LA PHYSICO-CHIMIE Cette vaste science, qui s'occupe des propriétés de la matière et de leurs relations avec la nature chimique de chaque corps, existait sous forme de chapitres détachés, avant de former un tout cimenté par les principes de la thermodynamique, avec, comme base, l'idée de molécules et d'atomes. Les recherches de Gay-Lussac sur les gaz, celles de Dumas sur les densités de vapeur, forment déjà des parties de cette science. Tout le long du dix-neuvième siècle, de nouveaux faits viennent peu à peu se ranger dans le même cadre, en même temps que le lien qui les relie commence à apparaître.

LES DONNÉES DE LA THERMOCHIMIE Lavoisier et Laplace avaient fondé la thermochimie, en faisant les premières mesures de chaleur dégagée dans quelques combustions. La question, aussi importante du point de vue pratique que pour les théoriciens, est reprise par divers savants, en particulier par Despretz ; mais ce n'est qu'avec des expériences faites au Conservatoire des arts et métiers par Favre et Silbermann que l'on trouve une première série importante de données sur la thermochimie, faites par une méthode calorimétrique nouvelle et fort ingénieuse. De ces mesures, Favre tire une règle presque identique à celle que Berthelot énoncera avec plus de précision. Le Danois Thomsen, puis l'illustre chimiste Marcellin Berthelot font, à leur tour, une série de mesures beaucoup plus étendues, et Berthelot résume son immense travail dans un ouvrage resté célèbre : *Mécanique chimique fondée sur la thermochimie*. Son ambition est de donner une loi qui permette de prévoir si une réaction chimique donnée est susceptible ou non de se produire ; la règle à laquelle il donne le nom de « principe du travail maximum » n'est, il est vrai, pas sans exception ; elle s'applique cependant dans la plupart des cas et peut rendre de grands services.

LES DISSOLUTIONS Rien de plus banal que la dissolution dans l'eau d'un morceau de sel ou de sucre ; rien de plus curieux cependant que cette disparition des propriétés de cohésion d'un corps solide, qui se répand

dans tout l'espace occupé par le liquide comme le fait un gaz à qui est offert un espace vide. Dès 1839, Gay-Lussac remarquait l'analogie entre le phénomène de la dissolution et celui de la formation d'une vapeur ; il fallait découvrir un grand nombre de faits encore inconnus avant que cet aperçu génial pût servir de base à l'étude des dissolutions. Peu à peu, quelques lois simples se dégagent d'une masse énorme de faits. Les plus remarquables sont établies par Raoult, qui, dans une longue série de recherches commencées en 1878, étudie la congélation et la vaporisation d'un dissolvant qui tient un corps solide en dissolution, et fonde les deux branches de la physico-chimie auxquelles il donne les noms de cryoscopie et de tonométrie. En dehors de cas exceptionnels, il montre que l'influence du corps dissous, lorsqu'il est en petite quantité, s'exprime par des lois très simples, où entre en première ligne le *poids moléculaire* de ce corps ; il en déduit un moyen, aujourd'hui constamment employé en chimie organique, pour déterminer ce poids moléculaire par simple observation des propriétés d'une dissolution du corps à étudier. Toutefois, certains solvants donnent des résultats qui ne sont pas conformes aux lois simples, et parmi ces exceptions se trouvent justement les dissolutions des sels dans l'eau ; d'où cette idée nouvelle que, dans le nombre immense de liquides que connaît la chimie, l'eau est un corps tout à fait exceptionnel.

Les dissolutions de sels dans l'eau présentent une autre propriété exceptionnelle : elles sont conductrices de l'électricité. Les lois de cette conductibilité se précisent peu à peu, à la suite de nombreuses mesures parmi lesquelles il faut citer, en France, celles de Bouty. Tous ces résultats conduisent, vers 1887, le physicien suédois Arrhenius à l'hypothèse hardie suivant laquelle, dans leurs dissolutions aqueuses, les sels seraient dissociés en *ions*, portant chacun une charge électrique et dont les mouvements expliquent la conductibilité. Les anomalies, observées par Raoult, s'expliquent par cette dissociation qui a pour effet de doubler le nombre des molécules présentes dans la solution.

OSMOSE Le phénomène de l'osmose a ouvert une autre voie pour l'étude des dissolutions. Dès 1748, l'abbé Nollet avait observé que les divers corps ne traversent pas également une paroi perméable comme une vessie ; les physiciens n'apportèrent pas l'attention qu'il méritait à ce phénomène ; ce sont des biologistes qui, les premiers, en virent l'importance. Dutrochet, médecin et physiologiste, en fit, à partir de 1827, une étude approfondie, et en vit toute l'importance pour l'explication des échanges qui se produisent entre les diverses parties de l'organisme. Ce sont deux botanistes allemands, Traube en 1867 et Pfeffer en 1877, qui réussirent à

obtenir des parois *semi-perméables*, laissant passer le solvant, mais arrêtant les sels dissous. Cette découverte permit de reprendre l'idée de Gay-Lussac sur l'analogie entre la dissolution et la formation des vapeurs, et de lui faire porter tous ses fruits ; elle permit aussi, un peu plus tard, d'appliquer les principes de la thermodynamique à l'étude théorique des dissolutions. L'Américain Gibbs, le Hollandais Vant'Hoff, le Français Duhem obtinrent ainsi des résultats définitifs.

LES ÉQUILIBRES CHIMIQUES La thermodynamique avait, du reste, déjà commencé la conquête du domaine de la physico-chimie ; depuis Sainte-Claire Deville, il devenait évident que les méthodes de la physique étaient applicables à l'étude, au moins dans certains cas, des équilibres chimiques. L'histoire de cette conquête appartient plus encore à l'histoire de la chimie qu'à celle de la physique. Le grand novateur en cette matière a été le mathématicien américain Willard Gibbs qui, dès 1876, avait déduit des principes de la thermodynamique les lois les plus importantes de la statique chimique. Énoncées en un langage extraordinairement général et abstrait, sans le moindre souci de les appliquer à des cas concrets, ces lois restèrent longtemps comme ensevelies sous les formules mathématiques ; plusieurs d'entre elles furent retrouvées par des hommes qui avaient une vision plus concrète des choses, en particulier par Le Chatelier, et ce n'est qu'après cette seconde découverte que l'œuvre de Gibbs fut comprise. En même temps, Moutier, par une étude thermodynamique moins générale que celle de Gibbs, arrivait à quelques résultats intéressants. A partir de 1888, Duhem, excellent mathématicien et logicien impeccable, s'attachait à faire connaître, à développer, à perfectionner l'œuvre peu accessible de Gibbs, et rendait ainsi un très grand service à la science ; avec Le Chatelier et le Hollandais Vant'Hoff, il peut être considéré comme l'un des fondateurs de la thermodynamique chimique.

IV

ÉLASTICITÉ ET VIBRATIONS

THÉORIE MATHÉMATIQUE DE L'ÉLASTICITÉ On connaissait depuis longtemps les premiers faits relatifs à l'élasticité des corps solides qui, déformés par une action extérieure, reviennent spontanément à leur forme naturelle ; avant la fin du dix-septième siècle, on avait déjà énoncé la loi la plus simple de

ces phénomènes, loi d'après laquelle la déformation est proportionnelle à la force qui la produit. Un très remarquable exemple de la déformation élastique avait été étudié par Coulomb dans ses belles études sur la torsion des fils.

Ce n'est cependant qu'au dix-neuvième siècle que le problème fut abordé dans toute sa généralité. Il n'y a pas lieu d'en être surpris, car le problème est bien autrement complexe que pour les gaz ou les liquides, pour lesquels le volume seul est à considérer, tandis qu'un corps solide peut être sujet à une infinie variété de déformations différentes. Ce sont surtout les mathématiciens et les ingénieurs qui s'attachent à cette question difficile ; les uns y trouvent l'occasion de traiter de très beaux problèmes, les autres ont besoin de la résoudre pour étudier rationnellement l'équilibre de leurs constructions, dans lesquelles on tente de ne plus rien laisser à l'empirisme ni au hasard. Enfin, les idées nouvelles de Fresnel sur la propagation des ondes lumineuses dans l'éther, les propriétés élastiques étranges que l'on est amené à supposer à ce fluide hypothétique, incitent à étudier dans toute leur généralité les propriétés de tous les milieux élastiques imaginables, et il est curieux de voir les mêmes théories mathématiques servir successivement à étudier l'équilibre des constructions métalliques et la propagation des ondes lumineuses. Presque tous les mathématiciens du dix-neuvième siècle pourraient être cités à ce propos. Navier, ingénieur des ponts et chaussées, l'un des premiers constructeurs de ponts suspendus en France, en même temps qu'habile mathématicien, fut le premier, à partir de 1821, à prendre le problème dans toute sa généralité ; dans les années suivantes, Poisson, Cauchy, un peu plus tard Lamé, de Saint-Venant, suivirent la voie qu'il avait ouverte. Souvent, il est vrai, les problèmes que pose la pratique de l'art de l'ingénieur sont trop compliqués pour que la théorie mathématique en puisse donner une solution complète, et l'on est obligé de faire bien des simplifications peu satisfaisantes pour un logicien ; la technique de la résistance des matériaux n'aurait cependant pas pu naître et se développer sans s'appuyer sur la base solide de la théorie de l'élasticité.

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE L'ÉLASTICITÉ

Quant aux études expérimentales sur l'élasticité des solides, il en a été fait un très grand nombre, les unes, comme celles de Coulomb, de Savart, de Masson, en vue de vérifier les résultats de la théorie ou de déterminer les constantes caractéristiques des divers corps, d'autres, beaucoup plus nombreuses, en vue de l'essai des matériaux destinés aux usages industriels. Les appareils destinés à ces essais sont, depuis longtemps, sortis des laboratoires scientifiques pour entrer dans la pratique quotidienne des usines métallurgiques.

VIBRATION DES CORPS SOLIDES Au même chapitre de la physique se rattache l'étude des vibrations des corps, et par là toute l'acoustique. Les mathématiciens du dix-neuvième siècle continuèrent les travaux de ceux du siècle précédent, études fructueuses pour les progrès des mathématiques plus que pour ceux de la physique. Quant à l'étude expérimentale de ces vibrations, elle a profité de tous les progrès de la technique : enregistrement direct des mouvements les plus rapides sur un cylindre enduit de noir de fumée, soit pour l'étude des mouvements eux-mêmes, soit en vue de la mesure de petits intervalles de temps ; étude photographique des mouvements ; composition optique des mouvements par l'ingénieuse méthode de Lissajous (1857).

ACOUSTIQUE L'acoustique est déjà, en quelque sorte, partagée entre la mécanique pour l'étude des corps vibrants, et la physiologie pour celle des sensations sonores. Dans ce domaine, il faut seulement citer ici l'éclaircissement définitif de la théorie du *timbre*, cette qualité qui fait que deux sons de même hauteur, produits par deux instruments différents, ne donnent pas la même impression sur l'oreille. Déjà, en 1726, le grand musicien Rameau avait, sans aider son oreille d'aucun secours étranger, distingué les harmoniques qui accompagnent toujours le son principal, et, à la fin du dix-huitième siècle, Monge avait indiqué que les divers timbres sont caractérisés par le nombre et l'intensité de ces harmoniques. Les travaux de Fourier sur les fonctions périodiques donnèrent enfin l'instrument mathématique nécessaire pour préciser ces aperçus ; en s'appuyant sur eux, le grand physicien et physiologiste Helmholtz donnait, en 1863, une théorie définitive du timbre des sons.

V

L'ÉLECTRICITÉ. LIEN AVEC LA DOCTRINE DE L'ÉNERGIE. LES MESURES ÉLECTRIQUES.

LOIS QUI RÉGISSENT L'INTENSITÉ DU COURANT Après les découvertes d'Ørsted, d'Ampère et de Faraday, les principaux grands faits étaient connus. La période suivante est surtout une période de consolidation employée, si l'on peut ainsi parler, à organiser le pays conquis. D'une part, les procédés techniques se perfectionnent, les méthodes et les appareils de mesure se développent ; d'autre

part, on relie tout ce qui était connu par la doctrine de la conservation de l'énergie, fruit des découvertes en thermodynamique. Cet ensemble forme un travail moins brillant, moins rapide que les grandes découvertes de la période précédente ; il est l'œuvre collective et lente d'un très grand nombre d'ouvriers de tous les pays, œuvre nécessaire sans laquelle les belles applications modernes auraient été impossibles.

A peine la notion d'intensité de courant a-t-elle été clairement introduite par Ampère, l'appareil destiné à mesurer cette quantité se trouve inventé. Le multiplicateur de Schweigger et l'aiguille astatique d'Ampère, qui sont de la même année que la découverte d'Ørsted, conduisent bientôt Nobili au merveilleux instrument, le galvanomètre, qui sert à la mesure des courants électriques ; depuis un siècle, il a subi des perfectionnements, mais est resté le même quant à ses éléments essentiels, du moins pour les appareils de la plus grande sensibilité.

Les lois qui régissent l'intensité du courant ainsi que la notion de la *résistance* du circuit avaient été entrevues par Gay-Lussac et Thénard dans leurs expériences de 1811 ; Davy, en 1821, s'était approché de la vérité et avait donné des aperçus exacts, qui furent confirmés en 1825 par Becquerel ; mais c'est le physicien allemand Ohm qui, en 1827, arriva d'une manière complète aux lois qui portent son nom. Sa démonstration reposait sur une base expérimentale un peu fragile, et peut-être les *lois d'Ohm* n'auraient-elles pas été facilement acceptées si, en 1834, elles n'avaient été retrouvées par Pouillet dans un travail qui est un chef-d'œuvre de précision et de clarté. Pour mesurer les intensités des courants, Pouillet invente un appareil nouveau, la boussole des tangentes, qui a l'avantage de donner des mesures numériquement certaines et non une simple indication d'intensité plus ou moins grande. Armé de cet instrument, il étudie toutes les circonstances dont dépend l'intensité du courant qui passe dans un circuit. Ces circonstances sont évidemment de deux espèces : les unes sont intérieures à la pile, les autres sont relatives au circuit qui relie ses pôles. Pouillet est ainsi conduit à la notion de résistance du circuit, et il l'étend à la pile, qui a une résistance aussi ; il arrive enfin à la notion de force électromotrice, qui caractérise chaque élément de pile. Il se sert soit de la « pile hydro-électrique », dérivée de celle de Volta, soit de la pile thermo-électrique, découverte en 1821 par Seebeck, et à laquelle il avait donné une forme nouvelle.

DÉGAGEMENT DE CHALEUR

Très peu de temps après, les lois qui régissent le dégagement de chaleur par le courant électrique allaient être complètement élucidées. Ce phénomène était connu depuis fort longtemps ; la fusion d'un

fil par la décharge d'une bouteille de Leyde était une expérience classique au dix-huitième siècle ; Volta et après lui tous ceux qui se servirent de la pile avaient observé le même phénomène produit par le courant permanent que donne cet appareil. Chose curieuse, ce n'est qu'en 1841 que les lois très simples qui régissent ce dégagement de chaleur furent découvertes. Il est vrai que, tant que la notion de « résistance » d'un conducteur n'était pas introduite dans la science, ces lois ne pouvaient être énoncées d'une manière simple. Cela devenait facile après les travaux d'Ohm et de Pouillet. C'est ce que fit en 1841 le physicien anglais Joule, à la suite d'une série d'expériences admirablement conduites, qui ont précédé de très peu la découverte par le même physicien de la loi de transformation de travail mécanique en chaleur. Le lien entre les deux phénomènes, l'un purement mécanique et l'autre électrique, ne tarda pas à devenir évident, et ce fut l'origine de l'introduction des considérations énergétiques dans l'étude des phénomènes électriques. Comme pour la thermodynamique, les physiciens français ne prirent qu'une faible part au développement de cette doctrine. Il faut cependant citer une très remarquable série d'expériences de Favre, en partie en collaboration avec Silbermann, travaillant tous deux au Conservatoire des arts et métiers de 1850 à 1855. Ces recherches étaient une suite de celles, dont nous avons déjà parlé, qu'ils avaient entreprises sur le dégagement de chaleur dans les réactions chimiques. Utilisant le même appareil, ils étudièrent les phénomènes calorifiques produits aussi bien dans la pile que dans le circuit, et confirmèrent les conséquences du principe de l'équivalence. Un peu plus tard, Favre examina un cas plus compliqué, celui où le courant électrique actionne un moteur. Par des expériences très délicates, où le moteur tout entier était plongé dans le calorimètre, il put montrer que la production de travail (lorsque le moteur était employé à élever un poids) était accompagnée d'un déficit de chaleur, ce qui donnait une confirmation frappante de la grande loi découverte par Mayer et Joule.

L'ÉLECTROCHIMIE ET LA PILE

La pile restait, pendant toute cette période, le seul instrument dont on pût pratiquement se servir pour la production du courant électrique ; il est vrai qu'elle avait donné lieu à d'importantes recherches et subi d'intéressants perfectionnements. Dans l'histoire de ces progrès, nous trouvons tout d'abord le nom d'Antoine-César Becquerel, le premier d'une longue lignée de physiciens. Né en 1788, il avait fait comme officier les guerres du premier Empire ; après la paix, il se consacra à la physique et devint professeur au Muséum. Sa longue existence (il mourut en 1878) fut entièrement consacrée à

l'étude de l'électricité dont il put suivre les progrès pendant de longues années. De 1833 à 1840, il publia les six volumes de son *Traité expérimental de l'électricité et du magnétisme et de leurs rapports avec les phénomènes naturels*. Un peu plus tard (1855 et 1856), avec son fils Edmond, il publie un autre ouvrage intitulé : *Traité d'électricité et de magnétisme et de leurs applications à la chimie, à la physiologie et aux arts*; ces deux ouvrages sont précieux pour ceux qui veulent se faire une

idée précise sur l'état de la science à leur époque. La contribution personnelle de Becquerel au progrès de l'électricité est considérable.

Depuis la découverte de Volta, tous ceux qui s'étaient servis de la pile avaient eu à se plaindre des imperfections de cet appareil. L'altération des liquides et le phénomène de la polarisation avaient pour effet de diminuer rapidement l'effet de la pile, et les expériences de mesures étaient considérablement gênées par l'inconstance des effets que l'on voulait étudier. C'est Becquerel qui, en 1829, donna le moyen de s'affranchir de ces difficultés en inventant sa pile à deux liquides, dans laquelle le passage du courant laisse la force électromotrice parfaitement constante. Ce même appareil fut,



ANTOINE-CÉSAR BECQUEREL

sept ans plus tard, retrouvé par le physicien anglais Daniell, dont il a indûment gardé le nom.

Ses études sur les piles avaient conduit Becquerel à s'occuper des phénomènes d'électrolyse ; il y revint un peu plus tard (1845) après la découverte par Faraday des lois quantitatives de ce phénomène ; Becquerel découvre et étudie plusieurs cas intéressants d'*actions secondaires*, réactions chimiques entre les produits de la décomposition d'une part et d'autre part le liquide ou le métal des électrodes. Plusieurs des réactions étudiées eurent par la suite d'importantes applications ; en les découvrant, Becquerel ouvrait la voie à l'industrie électrochimique.

THERMO-ÉLECTRICITÉ Nous trouvons également le nom de Becquerel dans une série d'études importantes sur les phénomènes thermo-électriques, récemment découverts par Seebeck : un circuit formé de deux métaux différents

devient le siège d'un courant lorsque les points de soudure des deux métaux sont portés à des températures inégales. Becquerel, dès 1829, en fait une étude systématique et classe les métaux en une série qui permet de prévoir le sens du courant lorsqu'on les associe d'une manière quelconque. La suite de ces recherches devait être faite par son fils Edmond qui, en 1866, étudia plus complètement l'influence de la température, et fit les premières mesures de température en prenant comme thermomètre la pile thermo-électrique. On sait que cette méthode est devenue, entre les mains de M. Le Chatelier, l'une des méthodes industriellement les plus employées pour faire de telles mesures à des températures que le thermomètre à mercure ne permet pas d'atteindre.

LES COURANTS INDUITS

Depuis Faraday, les courants induits étaient connus, ainsi que l'essentiel des lois qui les régissent (1831); avant qu'ils deviennent la base de l'industrie électrique, il fallait se familiariser avec ces courants, voir de quoi ils étaient capables. En 1855, Foucault, dont nous retrouverons le nom à propos de l'histoire de l'optique, reprend les expériences de « magnétisme de rotation » d'Arago, et leur donne une ampleur qui ne laisse plus aucun doute sur leur cause; les courants produits dans la masse de cuivre en mouvement entre les pôles d'un électro-aimant prennent une telle intensité que l'échauffement devient énorme et que, pour faire tourner le disque, l'opérateur est obligé d'agir de toutes ses forces. Les techniciens modernes ont conservé le nom de « courants de Foucault » aux courants qui se produisent dans ces conditions, et ce nom revient à chaque instant dans les ouvrages consacrés aux machines de l'industrie électrique.

La possibilité d'obtenir des tensions très élevées par les phénomènes d'induction apparut bien peu de temps après la découverte de Faraday. Dès 1841, Masson et Breguet créaient le premier modèle de *bobine d'induction*, donnant déjà, par transformation du courant d'une pile périodiquement interrompu, des étincelles de longueur appréciable. Une longue série de perfectionnements amène peu à peu l'appareil à donner des effets remarquables, et, en fournissant le moyen de rendre lumineux les gaz raréfiés, contribue puissamment à l'éclosion de l'industrie électrique et de la spectroscopie. Foucault, en 1857, invente l'*interrupteur* dont le principe est encore employé; Fizeau, en 1853, introduit le perfectionnement capital qui consiste à employer un condensateur pour rendre plus brusque l'interruption du courant primaire; enfin, Ruhmkorff, constructeur né en Allemagne, mais établi à Paris, sans apporter aucun perfectionnement nouveau, sut faire connaître l'appareil, et

obtint pour cela, en 1864, un prix de cinquante mille francs fondé par le gouvernement français pour le développement de la science de l'électricité. Le plus grand service que cet appareil rendit à la science fut de faciliter l'étude de la décharge dans les gaz ; de ce fait, il contribua largement au développement de l'analyse spectrale, et plus tard à la découverte des rayons cathodiques et des rayons X, origine de tout le mouvement d'idées de notre temps. En même temps, la bobine d'induction donnait le moyen d'enflammer le mélange gazeux du moteur à explosion, et habitua les électriciens à l'emploi des hautes tensions qui devait révolutionner l'industrie moderne.

LES MESURES ÉLECTRIQUES L'art des mesures électriques avait trouvé ses premières méthodes entre les mains de Pouillet. Une fois bien connues les lois qui régissent les phénomènes électriques, cet art allait se développer par une étonnante diversité de procédés. Nous retrouverons ici les noms de Pouillet, de Becquerel, de Masson dans les débuts de cette technique si variée ; son développement final eut lieu surtout en Angleterre, en grande partie sous l'impulsion du grand physicien W. Thomson (plus tard lord Kelvin), qui était mû à la fois par l'importance qu'il attachait à toutes les déterminations numériques et par les nécessités de la technique naissante des câbles pour la télégraphie électrique. Personne n'a plus fortement que lui exprimé l'importance de la valeur numérique dans toute science : « Je dis souvent que si vous pouvez mesurer ce dont vous parlez, si vous pouvez l'exprimer par un nombre, vous savez quelque chose de votre sujet, mais si vous ne pouvez pas le mesurer, si vous ne pouvez pas l'exprimer en nombre, vos connaissances sont d'une pauvre espèce, et bien peu satisfaisantes ; ce peut être le commencement de la connaissance, mais vous êtes à peine, dans vos pensées, avancé vers la science, quel qu'en puisse être le sujet. »

La pose des premiers câbles transatlantiques, que W. Thomson avait dirigée lui-même et qui fut terminée en 1867, opération dans laquelle rien ne pouvait être laissé au hasard, avait fortement développé en lui ce sentiment de la nécessité de la détermination numérique ; il la sentit si bien qu'il fonda lui-même une maison industrielle pour la fabrication des instruments dont la plupart étaient imaginés ou perfectionnés par lui. Dans les années qui suivirent, la création de la grande industrie électrique allait trouver devant elle les éléments nécessaires pour établir, dès le début, sa technique sur une base scientifique.

Il manquait encore une chose importante dans les mesures que l'on faisait : il manquait un système d'unités bien coordonné et d'un emploi universel. C'est

également en Angleterre que l'idée de ce système prit naissance, en prenant comme base notre système métrique français. Nous verrons le développement, pendant le dix-neuvième siècle, de notre système d'unités, et son aboutissement au système universellement employé d'unités électriques.

PROPAGATION DE L'ÉLECTRICITÉ Dans tout cela, l'idée même de propagation progressive à travers le fil conducteur ou à travers le milieu extérieur, idée qui se présentait déjà aux expérimentateurs du dix-huitième siècle, avait complètement disparu. Ce n'est qu'avec Maxwell, dont l'admirable *Traité d'électricité* est de 1873, qu'elle allait reprendre toute son importance. Cependant, devançant considérablement son temps, Fizeau, dès 1850, avait fait une remarquable étude où une propagation progressive était mise en évidence. En collaboration avec l'ingénieur des télégraphes Gounelle, il étudie la propagation d'une décharge électrique à travers un long fil. On ne peut pas ne pas rapprocher ces expériences de celles, faites un siècle auparavant, par Guillaume Lemonnier, mais Fizeau y applique les ressources d'une technique délicate, dont ses belles recherches sur la vitesse de la lumière lui avaient révélé tous les secrets. Fizeau arrive à trouver une vitesse de propagation déterminée, dépendant de la nature du fil, vitesse toujours très grande, quoique inférieure à celle de la lumière. Ces résultats venaient trop tôt ; ils passèrent presque inaperçus ; il fallut attendre les théories de Maxwell et même les expériences de Hertz sur les ondes électriques pour que la signification en apparût nettement.

VI

LES UNITÉS

LE SYSTÈME MÉTRIQUE DEVIENT INTERNATIONAL Le système métrique avait eu définitivement gain de cause en France par la loi de 1837. Avant même d'être définitivement reconnu dans son pays d'origine, il avait commencé à conquérir le monde, au moins pour tous les usages scientifiques ; la conquête est aujourd'hui complète ; il est intéressant d'indiquer par quelles étapes elle est passée.

Aucune autorité, aucune loi n'eut à intervenir, au début, pour convertir les savants de tous pays au nouveau système d'unités ; dès qu'il s'est agi de mesures précises, ce système s'est imposé. C'est la mesure de la terre, la géodésie, science

essentiellement internationale par son objet même, qui a surtout contribué à en répandre l'usage dans les milieux scientifiques, et à lui faire apporter ses derniers perfectionnements. La mesure de la méridienne de France, bien que faite dans des conditions très défavorables, avait marqué un grand progrès dans la géodésie de précision ; peu à peu, les divers pays d'Europe avaient entrepris des mesures précises, et le raccordement de ces travaux exigeait que les unités de longueur employées fussent exactement comparées entre elles. Il arriva un moment où l'on eut l'impression que les mesures étaient faites, dans chaque pays, avec une précision plus grande que celle avec laquelle les règles métriques employées étaient comparées entre elles. C'est alors que la nécessité d'une organisation internationale apparut clairement.

Cette nécessité fut exprimée par l'Association géodésique, qui comprenait des représentants de la plupart des États de l'Europe, dans sa réunion de Berlin en 1867. Cette conférence émit le vœu que le mètre soit pris comme unité dans toutes les mesures géodésiques, en donnant à cette unité une précision encore plus grande que celle obtenue au moment de sa construction, et que toutes les mesures de vérification soient confiées à un Comité international.

Bien que cette proposition n'eût rien que d'extrêmement flatteur pour les fondateurs du système métrique, puisque l'on proposait de rendre leur œuvre internationale comme ils l'avaient eux-mêmes souhaité, en lui apportant les petits perfectionnements que les progrès de la science avaient rendus possibles après trois quarts de siècle, elle fut accueillie en France par la méfiance de quelques personnes incompetentes. Heureusement, ces sentiments ne furent qu'isolés. A la suite d'un rapport de l'illustre chimiste Dumas, le gouvernement français fut saisi de la question par l'Académie des sciences, et décida de réunir à Paris une Commission internationale, composée de délégués de tous les États, pour examiner la question. Les différents gouvernements désignèrent leurs délégués, dont la liste comprenait les plus illustres savants de tous les pays, et la date de la réunion fut fixée au 8 août 1870. Le 15 juillet, la guerre était déclarée. Quelques délégués se réunirent cependant ; le 13 août, ils se séparèrent.

La Commission se réunit de nouveau en septembre 1872 et cette fois aboutit à d'importants résultats. Il fut décidé que l'on construirait un « mètre international », copie aussi exacte que possible du mètre de 1798, mais défini avec une précision encore plus grande. Les fondateurs du système métrique estimaient que le centième de millimètre était l'extrême limite de la précision possible et désirable, et l'obtention d'une telle précision avait été à cette époque un immense progrès ; en plus

de soixante-dix ans, la science et la technique avaient continué à progresser, et une précision au moins dix fois plus grande était devenue utile et réalisable. On avait reconnu les avantages des « règles à traits », où la longueur est définie par la distance de deux traits tracés sur les surfaces polies, au lieu des « règles à bouts », qui définissent une longueur par la distance de deux faces terminales bien dressées. On décida donc de construire une règle à traits qui reproduirait aussi exactement que possible l'ancienne règle à bouts datant de 1798, et de prendre cette nouvelle règle comme unité internationale du système métrique ; de cette façon, rien ne serait changé aux unités adoptées en France ; le système métrique aurait seulement acquis une précision encore plus grande. Des copies de cette unité internationale devaient être remises aux gouvernements de tous les pays.

Pour réaliser ce travail considérable, la Commission émit le vœu qu'un bureau international, entretenu à frais communs par tous les États, soit créé à Paris et soit chargé de toutes les déterminations concernant les nouveaux étalons.

La réunion de 1872 n'était qu'une réunion scientifique, à laquelle le choix des délégués donnait une grande autorité, mais elle n'avait aucun caractère diplomatique et ne pouvait prendre aucune décision engageant les différents gouvernements. Pour réaliser les vœux de cette Commission, et en particulier la création du « Bureau international », le gouvernement français convoqua, en 1875, une conférence diplomatique qui aboutit à la signature d'une convention, dont l'article le plus important est celui-ci : « Les hautes parties contractantes s'engagent à fonder et à entretenir à frais commun un *Bureau international des poids et mesures*, scientifique et permanent, dont le siège est à Paris. »

La création projetée fut faite sans retard ; le gouvernement français céda gratuitement pour son usage le pavillon de Breteuil, situé dans le parc de Saint-Cloud. Le laboratoire ainsi créé travaille maintenant depuis près de cinquante ans ; il est devenu le grand centre des études métrologiques de haute précision, en même temps qu'une institution internationale des plus intéressantes. Il fonctionne sous la direction exclusive, sans aucune intervention des gouvernements, d'un « Comité international des poids et mesures », qui nomme le personnel technique du Bureau ; le budget a comme ressources les subventions, fixées par des règles déterminées, allouées par chacun des gouvernements signataires de la « convention ». Dès l'origine, on s'est proposé d'obtenir, au Bureau international, la plus grande précision réalisable dans la construction et la comparaison des étalons de longueur et de poids, et ce programme a conduit à des études très variées. C'est ainsi que, pour comparer des règles métriques, il faut tenir compte de leurs changements de longueur avec la

température, d'où la nécessité de mesurer avec précision leurs coefficients de dilatation ; ceux-ci ne peuvent être mesurés que si les températures elles-mêmes sont exactement déterminées, ce qui oblige à de délicates études sur la thermométrie. Le Bureau international fut ainsi amené à s'occuper de toutes les mesures touchant, de près ou de loin, à la métrologie, en y recherchant toujours la plus haute précision réalisable.

Le premier travail, achevé en 1889, fut la construction de règles métriques en platine iridié, copiées aussi exactement que possible sur le mètre de l'an VIII ; une de ces règles, choisie comme étalon prototype, est conservée au Bureau international ; les autres furent distribuées aux différents pays. Des opérations analogues furent faites pour les copies du kilogramme. Tous les pays ont donc maintenant une base commune pour leurs mesures, et si tous n'emploient pas le système métrique dans leurs opérations industrielles et commerciales, du moins aucun autre système de mesure n'apparaît dans les publications scientifiques.

Il y aurait imprudence à penser que la précision ainsi obtenue ne pourra jamais être dépassée ; il est toujours téméraire de fixer une limite au progrès de la science. Aussi le Bureau international a-t-il pris comme règle de suivre de près, en y contribuant pour sa part, tous les progrès de la métrologie. L'un de ces progrès a été le développement des idées de Fizeau sur l'emploi d'un rayon lumineux « avec ses séries d'ondulations d'une ténuité extrême, mais parfaitement régulières » comme unité naturelle de longueur. Fizeau avait utilisé cet « admirable micromètre » pour mesurer des longueurs extrêmement petites ; un progrès important fut fait, vers 1888, par les Américains Michelson et Morley, qui montrèrent la possibilité d'employer la méthode optique pour mesurer des longueurs beaucoup plus grandes. Il devenait dès lors possible de considérer la longueur d'onde d'une radiation lumineuse comme une unité naturelle, et de l'employer pour remplir le rôle que les fondateurs du système métrique avaient espéré obtenir par la mesure du méridien terrestre ou par celle du pendule à seconde. Il fallait toutefois que la longueur d'onde employée ait été exactement comparée au mètre. Cette mesure délicate fut exécutée en 1892 au Bureau international des poids et mesures par Michelson, aidé par Benoît, qui était alors directeur du Bureau et qui l'a dirigé pendant vingt-six ans. La même détermination a été reprise en 1907, avec une précision encore plus grande ; le mètre peut être considéré comme déterminé par sa valeur au moyen de la longueur d'onde d'une radiation lumineuse avec la même précision que par les règles métriques ; on est à l'abri de toute possibilité de disparition de la base de notre système, quels que soient les accidents futurs sur les étalons qui la représentent.

**LES UNITÉS
ÉLECTRIQUES**

Le progrès des méthodes de mesures électriques allait conduire les physiciens à s'entendre entre eux pour le choix d'un grand nombre de nouvelles unités. On serait bientôt arrivé à la confusion si, pour chacune des quantités que l'on apprenait à mesurer, on avait choisi arbitrairement une unité nouvelle. Dans la science de l'électricité, ce que l'on mesure ne tombe pas directement sous les sens ; nous ne voyons ni l'intensité d'un courant ni la résistance électrique d'un fil métallique ; nous mesurons toutes ces quantités par des effets mécaniques ou des transformations d'énergie en chaleur. Il est donc facile de concevoir que l'on puisse rattacher un « système d'unités électriques » aux unités qui servent à mesurer les quantités que l'on rencontre dans l'étude de la mécanique. La nécessité d'un tel système d'unités et la possibilité de le rattacher aux unités fondamentales de longueur de temps et de masse apparurent dès que fut entrepris un travail collectif exigeant la comparaison de mesures faites par des observateurs éloignés les uns des autres. En 1840, le grand géomètre allemand Gauss fonda, avec un certain nombre de physiciens de divers pays, une « union magnétique » dont le but était d'étudier les phénomènes du magnétisme terrestre par des observations simultanées et souvent répétées dans un certain nombre de laboratoires d'Europe. Pour que les mesures fussent comparables, il fallait bien qu'elles fussent rapportées aux mêmes unités, et c'est à ce propos que Gauss indiqua la possibilité de les rattacher aux trois unités fondamentales, qu'il emprunta au système métrique. L'unité de longueur était le millimètre et l'unité de masse le milligramme.

L'Union magnétique n'eut qu'une assez courte durée, mais l'idée de Gauss ne fut pas perdue. Bientôt, le commencement des applications de l'électricité, et en particulier le développement du télégraphe, imposa de plus en plus la nécessité de choisir des unités pour toutes les quantités que l'on avait à mesurer. C'est surtout en Angleterre que l'idée prit corps, en grande partie sous l'impulsion de W. Thomson et de l'Association britannique pour l'avancement des sciences. Il s'agissait de choisir un système d'unités bien coordonné, dans lequel chaque unité ne soit pas disproportionnée avec les valeurs usuelles des grandeurs que l'on aurait à mesurer. Après quelques tâtonnements, l'Association britannique s'arrêta à un système dont les unités fondamentales étaient le centimètre, le gramme et la seconde, et qui est désigné sous le nom de système C. G. S. Les unités électriques devaient s'en déduire en prenant pour chacune d'elles un multiple décimal convenablement choisi afin de les rendre commodément utilisables. Sans autre sanction qu'une entente tacite, plusieurs des unités ainsi choisies devinrent d'un emploi

commun en Angleterre ; les savants français s'étaient, pour la plupart, désintéressés de cette importante question, bien que notre pays en ait fourni les éléments par le système métrique, auquel les électriciens anglais s'étaient ralliés sans hésitation.

C'est à Paris que le système d'unités électriques allait être définitivement sanctionné, pour être ensuite universellement adopté. Vers 1880, le grand public commençait à s'intéresser aux progrès de l'électricité. L'emploi du télégraphe était entré dans les mœurs et rendait les plus grands services ; les lampes à arc avaient déjà donné lieu à quelques applications qui avaient vivement intéressé le public ; la lampe à incandescence faisait ses débuts, et tout le monde avait entendu parler de l'invention merveilleuse du téléphone. Quelques hommes hardis, qui n'étaient pas tous des savants, mais qui avaient le sens des affaires et de l'opportunité, eurent l'idée de faire à Paris une exposition internationale d'électricité. Elle eut lieu en 1881 au Palais de l'industrie. On en parlera un peu plus longuement dans le chapitre consacré aux applications ; disons seulement ici qu'elle eut le plus grand succès et qu'au point de vue scientifique, elle eut ce grand avantage de réveiller un peu la curiosité des savants français, dont beaucoup s'étaient trop peu tenus au courant des progrès faits dans d'autres pays. En même temps, on réunit un congrès d'électricité, auquel prirent part un grand nombre de savants et de techniciens du monde entier. La France y tint une place honorable, bien que peu de nos savants fussent au courant des questions d'unités qui allaient être agitées. Notre pays fut surtout représenté par Mascart, professeur au Collège de France, et l'Angleterre par W. Thomson. C'est dans cette réunion, en réalité dans un tout petit groupe de quelques hommes, que fut décidée l'adoption des unités dont l'emploi est devenu universel, avec les noms empruntés aux savants de tous pays qui avaient fondé la science de l'électricité. Depuis ce moment les noms d'ampère, de volt, de farad, d'ohm, sont prononcés à chaque instant par les techniciens de tous les pays et leur rappellent la reconnaissance qu'ils doivent aux fondateurs de leur science.

Les nouvelles unités étaient définies d'une manière abstraite, par un rattachement rationnel mais compliqué aux « unités fondamentales » ; pour les besoins de la pratique, il était nécessaire d'en obtenir des représentations matérielles. Les mesures faites sous l'impulsion de l'Association britannique donnaient déjà, à ce sujet, des indications d'une précision presque satisfaisante ; il fallait faire encore mieux. Les savants français contribuèrent pour une bonne part à ce travail de haute précision. De tous côtés, de nouvelles méthodes furent imaginées et mises en pratique.

Il faut citer tout particulièrement celles qu'imagina Lippmann et qu'il réalisa lui-même ou qu'il fit réaliser par ses élèves. Aujourd'hui, il reste bien peu à faire pour amener ces travaux à la perfection.

VII

L'OPTIQUE APRÈS FRESNEL. SPECTROSCOPIE ET ÉTUDE DES RADIATIONS.

CONTINUATION DE L'ŒUVRE DE FRESNEL Nous avons laissé l'optique au moment où, après une vive lutte, la théorie des ondulations n'était presque plus contestée. Dans la période où nous entrons, cette théorie ne servira plus de champ de bataille ; elle sera prise comme instrument pour de nouvelles découvertes, ce qui est un autre moyen de démontrer l'exactitude d'une théorie.

C'est cependant le désir d'apporter une nouvelle confirmation à la théorie des ondes qui fut l'origine des très belles recherches faites au milieu du dix-neuvième siècle sur la vitesse de la lumière.

La théorie des ondes, on le savait depuis Huygens, veut que la lumière se propage plus vite dans le vide que dans tout autre milieu matériel, et par suite qu'elle se propage plus vite dans l'air (qui, pour la lumière, équivaut presque au vide) que dans l'eau. La querelle était bien vieille ; elle avait commencé au dix-septième siècle entre Descartes et Fermat ; elle s'était assoupie devant l'impossibilité où l'on était de trancher la question par une expérience directe. On savait en effet, depuis Rømer et Bradley, que la lumière se propage avec une vitesse énorme, qu'elle traverse la plus grande longueur de la France en un trois centième de seconde. Comment espérer que l'on pourrait mesurer cette vitesse dans une expérience de laboratoire ? On n'aurait peut-être jamais essayé de le faire s'il ne s'était agi de départager Descartes et Fermat, Huygens et Newton.

Arago, toujours intéressé par la querelle entre les deux théories, avait maintes fois insisté sur l'intérêt que présenterait cette expérience cruciale ; il avait même publié en 1842 un projet d'expérience, qui eût été difficilement réalisable, mais qui cependant donnait quelques idées intéressantes. La question fut résolue à la fois par deux physiciens d'une rare ingéniosité, qui avaient plusieurs fois travaillé ensemble, mais qui à ce moment étaient en concurrence : Fizeau et Foucault.



EXPÉRIENCE DU PENDULE DE FOUCAULT AU PANTHÉON
(Mars-Avril 1851.)

FIZEAU ET
FOUCAULT

Fizeau naquit en 1819. Son père, professeur à la Faculté de médecine de Paris, le poussa vers les études médicales, qu'il abandonna bientôt pour se livrer à ses goûts scientifiques. Sans autre laboratoire que la maison de son père, il répéta quelques expériences et fut bientôt attiré par la découverte récente de la photographie. Ces premiers essais l'amènèrent, en 1841, à un perfectionnement important dans l'emploi de la plaque daguérienne, dont il réussit à augmenter beaucoup la sensibilité, en même temps qu'il donnait aux images une vigueur plus grande.

Ces découvertes le rendirent célèbre dans le petit cercle des adeptes de la photographie. Foucault, qui s'y intéressait aussi, vint lui demander quelques conseils, et c'est comme photographes amateurs que les deux jeunes physiciens commencèrent leur collaboration.

Plus encore que Fizeau, Foucault fut un autodidacte ; lui aussi commença par étudier la médecine, mais s'en dégoûta bien vite. Il avait, dès son enfance, en faisant mollement des études médiocres, manifesté une habileté manuelle remarquable ; le

hasard fit qu'il offrit ses services comme préparateur à un certain docteur Donné, qui faisait un cours libre de microscopie. Le jeune Foucault, qui ne savait rien, mais qui comprenait tout, rendit quelques services à son maître en perfectionnant quelques-uns des appareils dont il se servait. Donné, en même temps qu'il enseignait l'usage du microscope, était chargé au *Journal des Débats* de rendre compte des séances de l'Académie des sciences ; en 1844, il abandonna cette charge et la fit confier à Foucault, alors âgé de vingt-cinq ans. La tâche était bien délicate pour un jeune homme qui n'avait presque rien appris dans les écoles ni dans les livres ; il y réussit admirablement, montrant des qualités d'écrivain qui lui concilièrent tous les lecteurs et une liberté de jugement qui lui valut beaucoup d'admirateurs et quelques rancunes. Il apprit beaucoup en rendant compte des travaux des autres et com-



FOUCAULT

mença à être connu dans le monde scientifique avant d'avoir publié aucun travail original.

La collaboration de Fizeau et de Foucault s'exerça d'abord sur les applications de la photographie ; les premiers, ils obtinrent, dès 1845, une image du soleil où tous les détails de la surface de l'astre étaient visibles, brillant début de la photographie astronomique qui devait conduire, de notre temps, à de magnifiques résultats. Arago, qui avait immédiatement aperçu dans l'invention de Daguerre l'origine d'un des plus puissants moyens d'investigation que l'homme ait découverts, s'intéressa vivement aux recherches que poursuivaient Fizeau et Foucault, et ne cessa de leur prodiguer ses conseils.

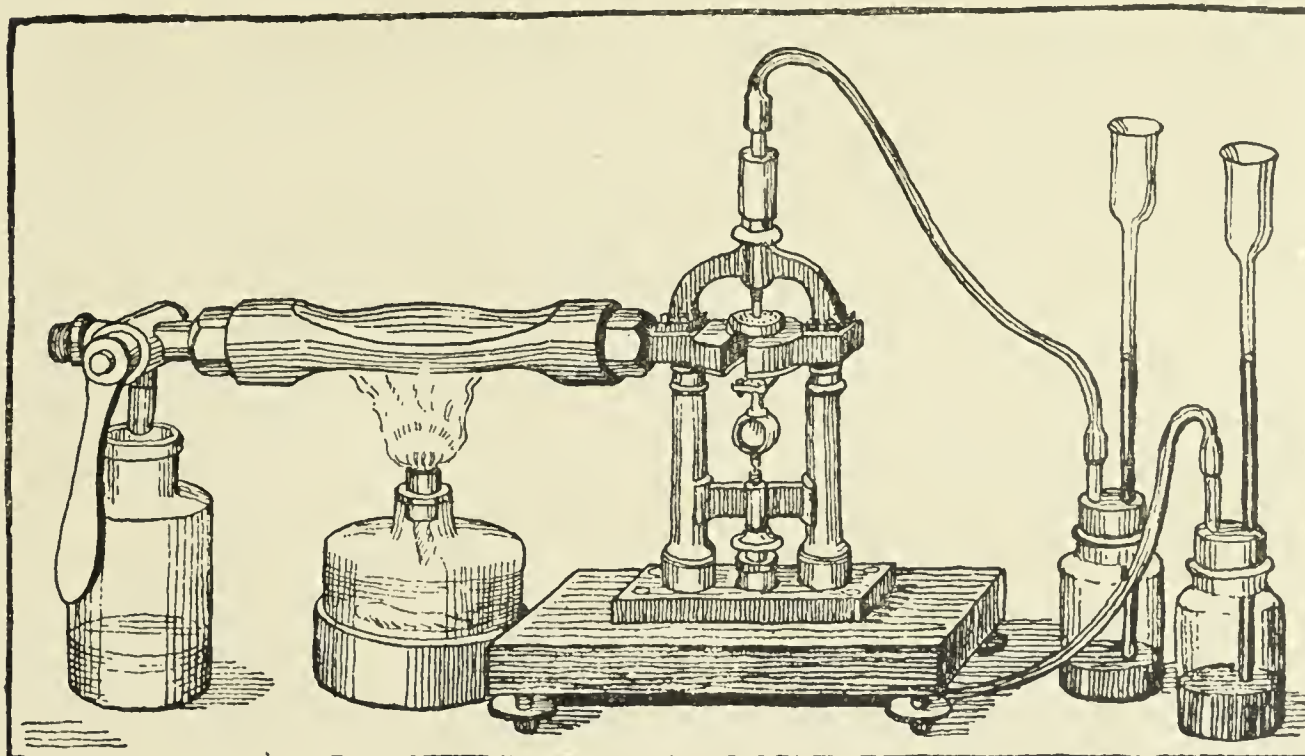
MESURE DE LA VITESSE DE LA LUMIÈRE

Cependant, Arago pensait toujours au moyen de trancher le différend entre les deux théories de la lumière ; il fit part aux deux physiciens de ses espoirs sur la mesure directe de la vitesse de la lumière et la comparaison entre la vitesse dans l'air et la vitesse dans l'eau. Personne mieux qu'eux ne pouvait résoudre ce difficile problème ; Foucault, le plus habile mécanicien de son temps, devait résoudre avec une rare élégance les difficultés qui se trouvaient sur leur route ; Fizeau était déjà un maître dans l'art de conduire les faisceaux lumineux. Ils se mirent ensemble au travail, mais bientôt, pour des raisons qu'ils n'ont pas fait connaître, cessèrent leur collaboration et continuèrent, chacun de son côté, la recherche commencée en commun.

Le premier, Fizeau réussit à mesurer la vitesse de la lumière sur une longueur de quelques kilomètres par sa belle méthode de la roue dentée. L'expérience fut faite pour la première fois en 1849 entre le belvédère de la maison qu'il habitait à Suresnes et une fenêtre d'une autre maison à Montmartre, distante de huit kilomètres. La lumière, partie de Suresnes, allait se réfléchir sur un miroir placé à Montmartre et revenait à son point de départ, effectuant le trajet aller et retour en moins d'un vingt millième de seconde ; c'est ce temps extraordinairement court que Fizeau réussit à mesurer. Il trouva une vitesse qui confirmait la belle observation de Rømer.

Cette expérience ne résolvait cependant pas la question posée par Arago, la comparaison des vitesses de la lumière dans l'air et dans l'eau ; ce n'était pas sur quelques kilomètres, mais bien sur quelques mètres, qu'il fallait expérimenter, et pour cela il fallait mesurer des durées de trajet se chiffrant par millièmes de seconde. Arago avait pensé pour cela à l'emploi du miroir tournant, dont l'ingé-

nieux physicien anglais Wheatstone (le Foucault de l'Angleterre, a-t-on dit quelquefois) avait fait de très belles applications. Chacun de son côté, Fizeau et Foucault attaquèrent ce difficile problème ; ils le résolurent presque en même temps. Foucault, mécanicien né, résout avec une ingéniosité vraiment admirable les problèmes qui se présentent, et arrive le premier au résultat. Au moyen d'une petite turbine à vapeur que Froment avait construite sur ses indications, véritable chef-



MIROIR TOURNANT DE FOUCAULT POUR LA MESURE DE LA VITESSE DE LA LUMIÈRE

d'œuvre de mécanique, il arrive du premier coup à faire tourner son petit miroir avec une vitesse de quatre cents tours par seconde. L'expérience confirme complètement les prévisions de la théorie des ondes et condamne celle de l'émission : la lumière se propage moins vite dans l'eau que dans l'air.

Arago n'espérait que ce résultat qualitatif, qui suffisait à trancher une vieille querelle ; son espoir était de beaucoup dépassé, car on pouvait obtenir une valeur numérique très exacte de la vitesse de la lumière. On aperçut immédiatement l'importance de cette détermination pour le progrès de l'astronomie. Les phénomènes astronomiques avaient donné la première évaluation de la vitesse de la lumière par la mesure du temps qu'elle met à nous venir d'un astre dont la distance nous est connue ; inversement, si la vitesse est mesurée par une expérience directe, la mesure

du temps donne un moyen précieux pour la détermination des distances, et les longueurs astronomiques se trouvent rattachées à nos unités ordinaires de longueur par l'intermédiaire de la vitesse de la lumière. Cette considération explique les grands efforts pour obtenir une précision de plus en plus grande dans la mesure de cette vitesse. L'une et l'autre des deux méthodes ont été employées pour cela. Fizeau n'avait pas cherché à obtenir le maximum de précision ; une mesure précise fut entreprise par Cornu, qui opérait entre l'Observatoire de Paris et la tour de Montlhéry. Expérimentateur habile, Cornu a été l'un des meilleurs continuateurs de Fizeau, en même temps qu'un remarquable professeur. Ses auditeurs de l'École polytechnique lui reprochaient bien parfois de glisser sur les difficultés et de masquer sous une parole élégante et facile les points délicats d'une théorie, mais ils lui savaient gré de leur rendre accessible une science à l'étude de laquelle les préparaient très peu leurs études presque exclusivement mathématiques. Ses recherches sur la vitesse de la lumière montrèrent que cette méthode peut donner des résultats très exacts ; sous son inspiration, des mesures analogues furent faites encore une fois, en 1902, entre l'observatoire de Nice et le sommet du mont Vinaigre situé à quarante-six kilomètres de l'observatoire.

Quant à la méthode du miroir tournant, Foucault en avait poussé très loin l'étude et était arrivé à des résultats fort exacts. C'est en Amérique que l'on a pu faire mieux en employant seulement des instruments plus puissants ; l'astronome Newcomb, puis le physicien Michelson sont arrivés à une précision que Michelson lui-même cherche en ce moment à dépasser en apportant à la méthode de Foucault des perfectionnements de détail.

LES APPLICATIONS DES INTER-FÉRENCES LUMINEUSES

Young et Fresnel avaient uniquement vu, dans les interférences de la lumière, un moyen très délicat pour résoudre des questions difficiles de philosophie scientifique ; on les eût sans doute bien surpris en leur disant que ces phénomènes donneraient un jour une méthode de mesure des longueurs d'une étonnante précision et que de simples ouvriers opticiens y trouveraient un procédé, d'un emploi quotidien, pour la vérification de leur travail. C'est en grande partie à Fizeau que ces applications sont dues.

Déjà avec Foucault, en 1845, il avait commencé à étudier les interférences, et avait montré que le phénomène est beaucoup plus simple et plus régulier qu'on n'aurait pu le supposer. Il y revient beaucoup plus tard, en 1864, et apporte alors aux moyens d'observation des perfectionnements décisifs. Il montre qu'en employant

une source de lumière convenable (flamme d'alcool contenant un sel de sodium, dont l'usage remontait aux recherches de Brewster vers 1828), le phénomène prend une régularité admirable et que l'on peut observer jusqu'à cinquante mille alternances de lumière et d'obscurité. L'idée lui vint alors de se servir de ce phénomène pour évaluer de très petites longueurs, idée qu'il exprime en ces termes : « On voit donc qu'un rayon de lumière avec ses séries d'ondulations d'une ténuité extrême, mais parfaitement régulières, peut être considéré, en quelque sorte, comme un micromètre naturel de la plus grande perfection, et particulièrement propre à déterminer des longueurs extrêmement petites qui échapperaient à tout autre moyen de mesure. » Il applique immédiatement cette idée à un problème particulièrement difficile, l'étude de la dilatation des corps cristallisés ; il s'agissait de mesurer la dilatation par la chaleur de corps qui, parfois, n'avaient que quelques millimètres dans leur plus grande dimension, ce qui conduisait à mesurer des variations de longueurs se chiffrant à peine par millièmes de millimètres. Le succès fut complet et dépassa de beaucoup en importance le problème particulier que Fizeau s'était posé ; c'était toute une nouvelle technique qui était inaugurée. Les applications en furent nombreuses et sont loin d'être épuisées. En 1883, l'habile constructeur Laurent fit passer cette méthode du laboratoire à l'atelier en indiquant le procédé que connaissent aujourd'hui tous les ouvriers pour contrôler le travail des surfaces de leurs verres. Dans le domaine des recherches de laboratoire, de très nombreuses applications, analogues à celle de Fizeau, ont été faites ; elles ont été de beaucoup étendues par les améliorations techniques apportées par l'Américain Michelson dont les recherches, commencées vers 1880, se poursuivent encore, en suivant sur bien des points les voies ouvertes par Fizeau. On peut dire qu'aujourd'hui le « micromètre naturel » dont parlait Fizeau est devenu l'instrument de mesure universel des longueurs, et l'on peut prévoir le moment où il remplacera complètement les règles divisées, toujours sujettes à altération, dans les mesures de grande précision.

C'est aussi Michelson qui a tiré de l'oubli une méthode indiquée en quelques mots par Fizeau pour évaluer le diamètre apparent des astres au moyen des phénomènes d'interférence. Dans les plus puissants télescopes, les étoiles n'apparaissent que comme des points ; leur diamètre apparent est trop petit pour être décelé, en sorte que les dimensions des étoiles nous restaient totalement inconnues. Fizeau avait indiqué en passant qu'en employant un phénomène d'interférence on pouvait trouver un moyen pour percer le mystère, et des essais avaient été faits en France pour essayer sa méthode ; mais les moyens mis en œuvre n'étaient pas assez puissants.

Ce n'est que tout récemment que des résultats ont été obtenus, et là encore Fizeau aura été l'instigateur de tout un monde de résultats nouveaux.

FONDATION DE LA SPECTROSCOPIE Avec Fresnel, l'étude des propriétés des diverses radiations était encore bien peu avancée. On savait que la lumière se compose de radiations simples, que chacune d'elles se caractérise par la rapidité plus ou moins grande de ses vibrations, et l'on avait des valeurs assez exactes des « longueurs d'onde », ou longueur des pas qui caractérise la marche de chacune d'elles. Il restait à fonder toute une science, consacrée à l'étude de ces radiations, à l'art de les séparer et de les mesurer, à l'examen de leurs propriétés. Ce fut une œuvre longue et collective, qui s'étend sur un demi-siècle, où tour à tour des idées confuses viennent se fondre en un ensemble imposant et où travaillèrent presque tous les physiciens du dix-neuvième siècle.

Le prisme, depuis Newton, était l'instrument servant à séparer les unes des autres les diverses radiations, *l'appareil dispersif* comme nous disons aujourd'hui. Vers 1823, Fraunhofer, le grand opticien de Munich, introduit en optique l'usage des « réseaux », assemblage de lignes alternativement transparentes et opaques extrêmement serrées ; il montre que l'on peut s'en servir pour faire des mesures très précises de longueurs d'onde, et commence, aussi bien au moyen de prismes que par ses réseaux, l'analyse de la lumière provenant des principales sources artificielles ou naturelles, y compris la lumière des étoiles, dont il donne une première classification basée sur l'analyse de leur lumière.

Cependant, l'étude des « radiations invisibles » était déjà commencée. On savait, par des expériences fort anciennes, que le chlorure d'argent noircit à la lumière, et c'était l'embryon de la photographie. En exposant une surface enduite de ce sel aux rayons d'un spectre, plusieurs physiciens, parmi lesquels Wollaston, au début du dix-neuvième siècle, avaient constaté que le sel noircit, même si on le place au delà de la limite du violet, là où l'œil ne perçoit plus rien ; ce fut l'origine de l'étude des radiations ultra-violettes. A l'autre bout du spectre, au delà du rouge, on avait constaté qu'un thermomètre accuse une élévation de température là où notre œil ne perçoit rien, et l'idée assez vague se fit jour que ces rayons jouaient un rôle important dans les phénomènes déjà connus sous le nom de « chaleur rayonnante », nom très fâcheux qui contribua pendant longtemps à entretenir des idées confuses. Les idées avaient pourtant été précisées d'une manière admirable par le grand Ampère, qui avait indiqué qu'en dehors des radiations visibles il y avait toute une série de radiations invisibles formant leur prolongement naturel et jouant le principal

rôle dans les échanges par rayonnement. Il suffit de lire la plupart des travaux de l'époque suivante pour s'apercevoir que cette notion fut mal comprise. Cependant, une première exploration dans cette région invisible fut faite à partir de 1830 par le physicien italien Melloni, qui résida longtemps à Paris et collabora avec les physiciens français, à une époque où des raisons politiques l'avaient exilé de Parme, sa patrie. Melloni étudie les « rayons calorifiques » par des procédés nouveaux qui eurent une grande influence sur le développement de la technique des radiations infra-rouges. Il emploie comme récepteur thermométrique une pile thermo-électrique, reliée à un galvanomètre imaginé par Nobili. Armé de cet appareil, il montre que les rayons invisibles ont les mêmes propriétés que la lumière, qu'ils se réfléchissent, se réfractent, sont absorbés comme eux, et il apprend aux physiciens quelles substances il faut employer pour les réfracter. L'emploi du sel gemme date de ces recherches. Plus tard, à partir de 1848, de La Provostay et Desains refirent ces expériences sans y ajouter grand'chose de nouveau. Il manquait dans tout cela un élément important : on opérait sur tout le rayonnement étudié, sans employer d'appareil dispersif ; les mesures de longueur d'onde, élément caractéristique de chaque radiation, manquaient complètement.

Cette lacune ne fut comblée qu'en 1879 par un jeune physicien, Mouton, dont la mort interrompit bientôt une carrière qui débutait très brillamment. Utilisant les phénomènes d'interférence dans le spectre, découverts par Fizeau et Foucault, et prenant une pile thermo-électrique comme détecteur des radiations, Mouton parvint à mesurer les longueurs d'onde des radiations invisibles et poussa ses mesures jusqu'à des ondes trois fois plus longues que les dernières radiations visibles. En même temps, il montra comment on peut correctement tracer la courbe qui donne l'énergie de chaque radiation dans un spectre, donnant ainsi une base solide à toute la belle série des études modernes sur le rayonnement, études dont la partie expérimentale était restée jusque-là dans le vague. L'année suivante, Pierre Curie, dont c'était le premier travail, en collaboration avec Desains, parvient, par une nouvelle méthode, à pousser beaucoup plus loin le spectre infra-rouge, et à l'étendre jusqu'à des ondes dix fois plus longues que les derniers rayons rouges visibles. Très peu de temps après, le physicien américain Langley entrait dans la voie ouverte par les physiciens français et y trouvait une belle moisson de découvertes.

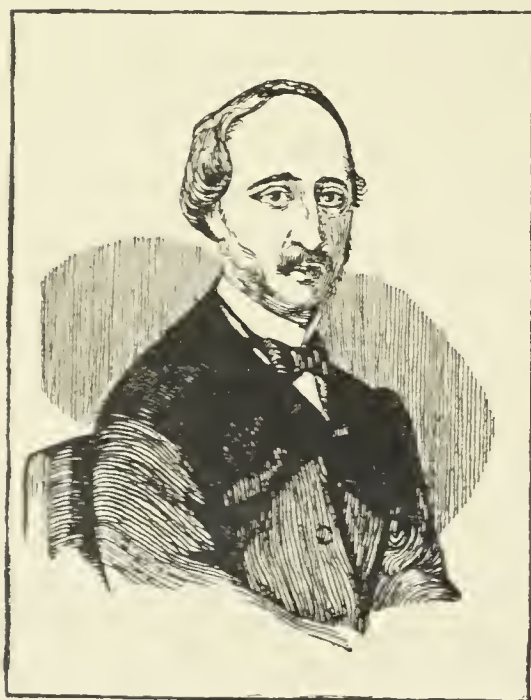
Du côté de l'ultra-violet, l'invention de la photographie allait rendre un grand service à la science, en donnant pour ces radiations invisibles un instrument d'étude incomparable. Edmond Becquerel, le premier, dès 1842, employa systématiquement

la plaque de Daguerre (inventée seulement depuis trois ans) à l'étude du spectre ultra-violet. Chaque nouveau perfectionnement de la photographie n'a cessé, depuis cette époque, de rejaillir sur l'étude des radiations, fournissant un procédé d'étude si commode et si sûr que, même pour les radiations visibles, on le préfère généralement à l'emploi direct de l'organe visuel.

Cependant, on regardait encore tout ce champ de rayons non visibles avec une certaine méfiance ; pendant de longues années, on crut nécessaire de démontrer et

redémontrer que les rayons invisibles n'étaient pas foncièrement différents des rayons visibles. Il serait fastidieux de donner la liste des recherches faites pour établir une vérité qui nous paraît évidente, mais qui ne l'était pas alors.

Un cri d'admiration accueillit, vers 1860, la découverte de ce que l'on appela immédiatement l'analyse spectrale, par Kirchhoff et Bunsen, l'un physicien d'esprit surtout mathématique, l'autre spécialisé dans l'étude de la chimie. L'admiration était tout à fait légitime, et la nouvelle doctrine se présentait avec un important cortège de découvertes : deux métaux nouveaux, le rubidium et le césium, une méthode d'analyse d'une sensibilité incomparable qui donnait l'espoir, bientôt réalisé, d'autres découvertes, l'explication des raies noires du



EDMOND BECQUEREL

spectre solaire, la composition chimique des astres révélée, ainsi que l'unité de constitution chimique de l'univers, tout cela méritait largement l'admiration des savants. Il n'en est que plus intéressant de constater que les faits principaux étaient déjà connus ; la difficulté était d'en faire jaillir une doctrine nouvelle. La coïncidence parfaite des « raies du sodium » avec les raies D du spectre solaire avait déjà été constatée par Foucault en 1849, ainsi que le « renversement » de ces raies dans les sources artificielles. Le spectroscope était déjà souvent employé, en particulier dans les expériences de Fizeau et Foucault. De ces éléments épars, Kirchhoff et Bunsen surent faire un tout. La nouvelle science eut en France de nombreux adeptes. C'est au moyen du spectroscope que Lecoq de Boisbaudran découvrit le métal gallium ; en astronomie, Rayet fut un des premiers à découvrir la nature des protubérances solaires, et Janssen donnait bientôt (1868), en même

temps que l'Anglais Lockyer, le moyen d'observer en tout temps ces magnifiques jets de flamme issus du soleil.

L'OPTIQUE DES CORPS EN MOUVEMENT C'est le phénomène de l'aberration de la lumière des étoiles, découvert par Bradley en 1728, qui offrit le premier exemple d'une influence du mouvement sur les phénomènes lumineux : par suite du mouvement de la terre, chaque étoile est vue dans une direction un peu déviée de celle où on la verrait réellement si la terre était immobile. L'explication de ce phénomène était facile dans la théorie de l'émission ; Fresnel avait montré que, moyennant certaines hypothèses sur les propriétés de « l'éther », on pouvait aussi bien l'expliquer dans la théorie des ondes. La théorie de l'aberration conduisit Fresnel à s'occuper de la troublante question suivante : l'éther est-il entraîné par la matière, ou bien un objet mobile se déplace-t-il à travers l'éther sans lui apporter aucun mouvement ? Fresnel trouve par des aperçus théoriques que l'entraînement est partiel, et il en donne la valeur.

Fizeau eut l'audace d'essayer de soumettre cette vue au contrôle de l'expérience. Le résultat annoncé par Fresnel fut complètement confirmé. Un courant d'air n'entraîne pas les ondes lumineuses ; un courant d'eau les entraîne partiellement. La théorie de la relativité a donné de ce résultat une interprétation tout autre, et y a trouvé une éclatante confirmation de ses principes.

L'expérience de Fizeau fut la première d'une longue série de recherches sur ce que l'on peut appeler l'optique des corps en mouvement. Ces recherches ont eu, le plus souvent, pour but de chercher à mettre en évidence le mouvement absolu des corps par rapport à l'éther. Tout le monde sait aujourd'hui que ces expériences ont donné un résultat absolument négatif, si bien que l'on a été amené à cette conclusion : le mouvement relatif des objets les uns par rapport aux autres a, seul, une réalité observable ; le mouvement absolu, par rapport à un *éther*, n'a aucun sens. C'est là l'une des bases des célèbres théories de la relativité.

Ce mouvement relatif, lui, a un sens concret et défini. Fizeau a montré que l'on peut le mettre en évidence par de pures expériences d'optique. Déjà, en 1842, le physicien autrichien Doppler, en étudiant les ondes sonores, avait montré que le son monte ou baisse selon que la source sonore se rapproche ou s'éloigne de l'observateur. Il avait essayé d'appliquer le même principe aux ondes lumineuses, mais il s'était complètement trompé et était arrivé à des conséquences véritablement absurdes. Ce fut Fizeau qui découvrit, en optique, le véritable phénomène con-

sistant en un très léger déplacement des lignes spectrales produit par le déplacement relatif de la source de lumière et de l'observateur (1848). Il était trop tôt pour que cette découverte pût être comprise et utilisée ; l'idée même de la séparation d'un rayonnement en radiations simples n'était pas encore une idée courante. Découvert de nouveau en Angleterre après le succès de l'analyse spectrale, vérifié par de nombreuses observations, en particulier par celles de Thollon en 1880 à l'observatoire de Nice qu'érigéait alors la munificence de Bischofsheim, le « principe de Doppler-Fizeau » a renouvelé nos connaissances en astrophysique, en donnant le moyen de mesurer les vitesses, par rapport à la terre, de tous les astres observables, quelle que soit leur distance. Ce principe est une des armes les plus puissantes dont nous disposions pour étudier la constitution du monde stellaire.

On voit qu'il n'est presque pas une des applications modernes de l'optique qui n'ait été commencée par Fizeau et poussée par lui aussi loin qu'il était possible de le faire avec les moyens dont on disposait de son temps. Son influence a été particulièrement grande sur ce que l'on peut appeler l'école américaine en optique. Il mourut en 1896, profondément admiré de ceux qui pouvaient apprécier son œuvre, mais profondément ignoré du grand public dont il ne recherchait pas les louanges.

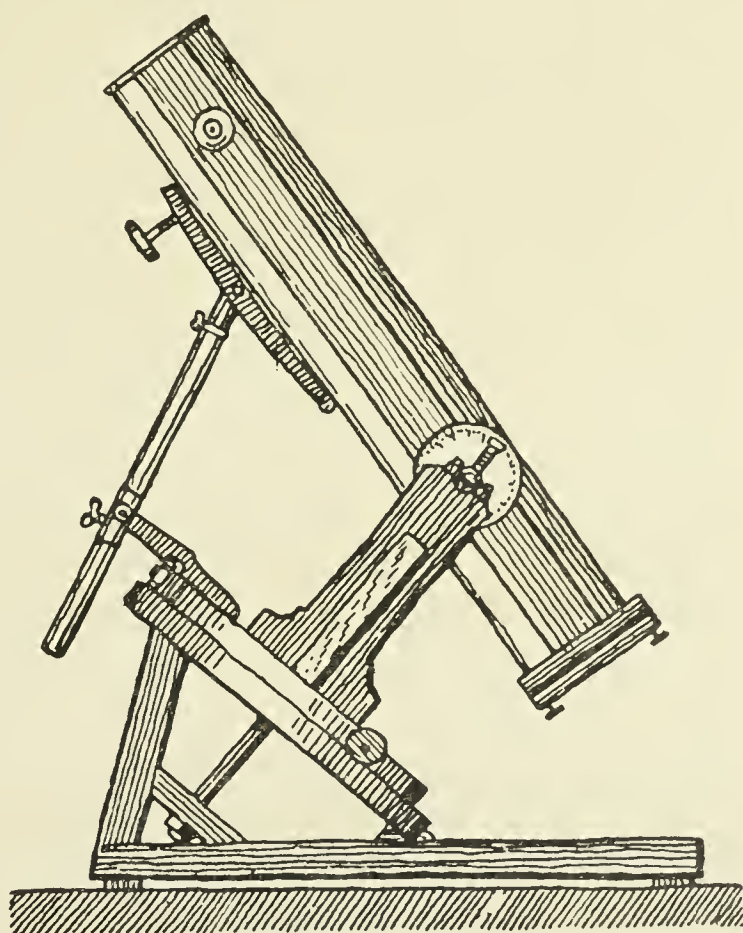
FOUCAULT ET LE PERFECTION- NEMENT DES INSTRUMENTS

C'est par la mécanique et par l'électricité que Foucault fut amené à s'occuper des instruments d'optique. On a dit quelques mots, dans un chapitre précédent, de ses recherches sur les courants induits connus encore sous le nom de « courants de Foucault » ; presque à la même époque (1849), il avait, pour la première fois, rendu pratique l'emploi de l'arc électrique, mettant entre les mains des physiciens pour les expériences d'optique une source de lumière incomparable.

Mais Foucault était avant tout mécanicien. Il n'était nullement mathématicien ; seulement sa vision directe des choses lui faisait apercevoir des propriétés géométriques qu'aucun géomètre n'avait aperçues, des conséquences des lois de la mécanique qu'aucun théoricien n'avait su faire sortir de ses équations. C'est ainsi qu'en 1851, il fut conduit à sa célèbre expérience du pendule, qu'il décrivit sous le titre : *Démonstration physique du mouvement de rotation de la terre au moyen du pendule*. L'expérience, faite d'abord par Foucault dans une cave de sa maison, éveilla un vif mouvement de curiosité ; elle fut répétée sur une plus grande échelle, d'abord à l'Observatoire, puis au Panthéon où, suspendu à la voûte, le pendule avait

une longueur de soixante-sept mètres et faisait de majestueuses oscillations, dont le va-et-vient durait seize secondes ; à chaque nouvelle oscillation, l'extrémité du pendule venait entamer un petit tas de sable, montrant qu'à chaque fois la terre avait tourné d'un petit angle. Tout Paris défila devant le pendule ; tous les théoriciens de la mécanique s'y intéressèrent, si bien que pendant la seule année 1851, l'Académie reçut vingt-six communications sur le pendule, dont plusieurs signées des plus grands mathématiciens de l'époque. Tous, naturellement, concluaient que les équations de la dynamique « permettaient de prévoir » le succès de l'expérience ; mais aucun d'eux ne l'avait prévu et plus d'un, peut-être, si on l'avait consulté, aurait déclaré l'expérience irréalisable.

Le grand géomètre Poinsoth suggéra à Foucault une expérience un peu différente qui, elle, devait avoir d'importantes conséquences pratiques. Familiarisé plus que personne avec la théorie de la rotation des corps solides, Poinsoth aperçut que la rotation de la terre pourrait être mise en évidence en utilisant comme terme de comparaison non plus le plan d'oscillation d'un pendule, mais l'axe de rotation d'un corps tournant avec une grande vitesse. Ce fut l'origine des travaux de Foucault sur le « gyroscope », instrument dont les applications aux arts mécaniques sont devenues nombreuses et importantes. Le mouvement de la terre fut mis en évidence, si bien que l'appareil donna un moyen pour trouver le nord, sans recourir aux astres et sans utiliser de boussole. Un demi-siècle plus tard, l'application, fort délicate, de cette méthode commençait à passer dans la pratique. Aujourd'hui, tous les navires sous-marins, dont la coque de fer empêche le fonctionnement de l'antique boussole, sont munis d'un « compas gyroscopique » qui dérive directement du gyroscope de Poinsoth



TÉLESCOPE DE FOUCAULT

et de Foucault, et l'on peut prévoir le moment où tous les grands navires en acier en seront munis.

En 1854, Foucault accepta le titre de « physicien de l'Observatoire », sans autre charge que d'appliquer son ingéniosité au progrès des instruments d'astronomie. Ce fut pour lui l'origine d'inventions extrêmement fécondes. La taille des grands miroirs de télescope était restée un art ; Foucault en fit une technique méthodique et raisonnée. Aux miroirs métalliques, il commence par substituer des miroirs de verre qu'il trouve le moyen d'argenter. Il se rend bientôt maître des procédés empiriques des opticiens, et donne le moyen de leur substituer une méthode rationnelle. Il construit alors plusieurs grands miroirs qui forment l'élément essentiel de magnifiques instruments. Les télescopes qu'il a construits sont aujourd'hui largement dépassés par les grands instruments des observatoires américains, mais les méthodes de travail et d'essai sont toujours celles qu'il a indiquées, et qui sont employées dans tous les bons ateliers d'optique ; l'argot des opticiens contient encore le verbe « foucaulter », qui veut dire : faire l'essai d'un instrument par la méthode de Foucault. Seules, les méthodes introduites par son émule Fizeau, et basées sur l'emploi des interférences, peuvent être comparées en précision à la méthode imaginée par Foucault.

La partie mécanique des instruments d'astronomie reçut aussi de lui d'importants perfectionnements. Il fut le premier à appliquer cette idée, déjà indiquée au dix-septième siècle par Claude Perrault, qu'au lieu de diriger vers le ciel un pesant instrument qui doit se déplacer pour suivre l'astre que l'on observe, il y aurait souvent avantage à renvoyer horizontalement, dans une position commode, le faisceau lumineux venant de l'astre au moyen d'une réflexion sur un miroir animé d'un mouvement convenable. Il réalise un modèle d'essai parfaitement réussi ; il entreprit la construction d'un grand *sidérostat*, mais il n'eut pas le temps de l'achever ; il mourut en 1868. Son idée ne fut pas perdue, et une grande partie des études modernes sur l'astronomie physique, qui exigent des appareils trop compliqués pour être attachés à un télescope de la forme classique, ont été faites au moyen de dispositifs inspirés de l'idée de Foucault. Comme créateur d'instruments nouveaux, Foucault ne laissa malheureusement pas, en France, de disciples dignes de lui et, pendant un certain temps, la construction française des instruments de recherche tomba dans la plus déplorable médiocrité.

VIII

LES PROPRIÉTÉS DES CRISTAUX

IMPORTANCE EN PHYSIQUE DE L'ÉTUDE DES MILIEUX CRISTALLISÉS Avec Haüy les lois qui régissent les formes des cristaux étaient à peu près complètement connues, et la cristallographie aurait pu passer pour une science presque finie. Elle allait, au contraire, prendre un développement imprévu en s'engageant dans des directions entièrement nouvelles.

D'une part, l'étude des relations entre la composition chimique et la forme cristalline allait établir le lien entre la cristallographie et la chimie, et donner lieu à d'importantes recherches qui appartiennent à l'histoire de la chimie.

D'autre part, l'œuvre de Haüy allait être complétée et étendue par Bravais en développant systématiquement l'hypothèse moléculaire.

Enfin, dépassant l'étude extérieure des formes, la cristallographie allait pénétrer dans celle des propriétés intimes des cristaux, en développant cette idée très simple qu'un cristal est un milieu non isotrope, c'est-à-dire un corps dont les propriétés ne sont pas les mêmes suivant les différentes directions.

INFLUENCE DE FRESNEL.

L'OPTIQUE DANS LES CRISTAUX Sur ce dernier point, c'est l'influence des travaux de Fresnel qui se fit directement sentir, et c'est par l'étude des propriétés optiques que le travail commença.

Fresnel avait découvert dans toute sa généralité la loi de la propagation de la lumière à travers un cristal. Toute une science nouvelle, l'optique cristalline, allait résulter de cette découverte ; elle fut un des sujets d'études favoris parmi les physiciens français dans la période qui suivit les travaux de Fresnel. Parmi ceux qui contribuèrent à fonder cette nouvelle science, il faut tout particulièrement citer de Sénarmont, le continuateur le plus direct de l'œuvre de Fresnel. Ingénieur des mines, professeur de minéralogie à l'École des mines, puis professeur de physique à l'École polytechnique, de Sénarmont consacra toute son œuvre scientifique à l'étude des cristaux, d'abord de leurs propriétés optiques, puis de leurs autres propriétés, en particulier de leur conductibilité pour la chaleur.

Une fois connues les propriétés optiques des divers cristaux, elles fournissent

un procédé d'étude incomparable pour la détermination des minéraux et la recherche de leur orientation. Dès 1844, l'Italien Amici avait construit un appareil spécialement adapté à ce genre de recherches, et permettant d'étudier complètement des cristaux même très petits. C'est surtout la science des minéraux et des roches qui a profité de cette technique, et c'est en France qu'elle s'est développée. L'histoire de cette technique et des résultats qu'elle a donnés appartient à la minéralogie plus qu'à la physique ; il suffira de rappeler ici les noms de Des Cloizeaux, l'un des instigateurs de l'emploi des méthodes optiques pour l'étude des roches et des minéraux, de Mallard, dont le *Traité d'optique cristallographique* (1879) est resté l'ouvrage le plus complet sur les propriétés optiques des cristaux, de Dufet, qui a perfectionné les méthodes pour l'étude de ces mêmes propriétés.

**L E CRISTAL MILIEU
NON ISOTROPE**

Ce n'est pas seulement la lumière qui révèle la diversité des propriétés d'un cristal avec la direction ; toutes les propriétés de la matière cristallisée se groupent autour de cette idée que le cristal n'est pas « isotrope ». Une fois cette idée acceptée, chacun des chapitres de la physique doit être repris pour s'adapter aux propriétés des corps cristallisés. Aussi voyons-nous successivement Navier traiter mathématiquement des propriétés élastiques des cristaux, et arriver, d'ailleurs, à des résultats difficiles à vérifier par l'expérience ; de Sénarmont étudier la conductibilité calorifique ; Fizeau étudier la dilatation, inégale dans les différentes directions, de ces mêmes corps. Peu à peu, le lien entre la forme cristalline et les propriétés physiques devient plus étroit, si bien que le seul aspect d'un cristal permet de prévoir qu'il aura telles propriétés.

C'est par ce genre de recherches que, de 1848 à 1851, Pasteur débute dans la carrière scientifique par ses belles découvertes sur les propriétés cristallographiques et optiques de l'acide tartrique et de ses sels, soit à l'état solide, soit en dissolution. Le phénomène de polarisation rotatoire, découvert par Arago en 1811 dans les cristaux de quartz et un peu plus tard par Biot sur certains liquides, avait été peu à peu trouvé sur un grand nombre de corps, en particulier sur les solutions d'acide tartrique extrait du tartre du vin. Le hasard fit bientôt découvrir des solutions d'acide tartrique, ayant toute les propriétés de l'acide tartrique ordinaire, mais ne produisant aucune rotation sur la lumière polarisée ; ce fait était resté isolé et énigmatique. Pasteur découvre que l'acide tartrique inactif est, en réalité, une combinaison de deux corps ayant des pouvoirs rotatoires inverses ; il est inactif par compensation ; les cristaux des deux variétés ont les mêmes faces, faisant entre elles les mêmes angles, mais ne sont cependant pas identiques ; ils sont *symétriques* l'un de l'autre, comme

sont la main droite et la main gauche. L'étude du pouvoir rotatoire devient un moyen très puissant pour pénétrer dans la connaissance de la molécule ; les travaux de Pasteur sont le point de départ de ce que l'on a appelé plus tard la stéréochimie.

Pasteur est surtout connu du grand public pour avoir révolutionné la biologie : ses premières recherches en optique et en cristallographie seraient facilement considérées comme un faux départ, comme un temps perdu pour les travaux qui ont fait sa gloire. La vérité est tout autre ; entre Pasteur opticien et cristallographe et Pasteur biologiste il n'y a aucune solution de continuité. L'un de ses premiers mémoires sur les fermentations se rapporte justement à la fermentation de l'acide tartrique ; il y découvre ce fait remarquable que les deux acides, droit et gauche, si parfaitement identiques au point de vue chimique, sont inégalement atteints par la fermentation, si bien qu'une méthode de séparation s'en déduit. Cette délicatesse d'une action biologique, comparée aux brutales actions chimiques, avait vivement frappé Pasteur ; il ne cessa de s'intéresser aux fermentations, et l'on sait quelles conséquences il sut déduire de leur étude. Un homme dont la formation intellectuelle était surtout physico-mathématique devint ainsi un grand novateur dans la science des êtres vivants.

Un autre des grands esprits du dix-neuvième siècle, Pierre Curie, allait, lui aussi, pour son début dans la carrière scientifique, s'attaquer à une étude sur les propriétés des cristaux. On savait depuis longtemps que certains cristaux, lorsqu'on les chauffe, s'électrisent ; les propriétés électriques de la tourmaline, qui attire les cendres lorsqu'on la retire du feu, étaient déjà un objet de curiosité au dix-huitième siècle. Haüy avait fait d'intéressantes observations sur cette propriété, en relation avec la forme des cristaux qui la présentent. En 1880, Pierre Curie, en collaboration avec son frère Jacques Curie, eut l'idée de chercher si une déformation d'un cristal, provoquée par la pression, ne produirait pas aussi un dégagement de charges électriques. Les deux frères découvrirent ainsi le phénomène de la « piézo-électricité », que présentent en particulier les cristaux de quartz, et dont ils étudièrent les lois. Partant de ce fait, Lippmann annonça qu'inversement l'électrisation du cristal devait amener une déformation, très petite il est vrai. Pierre et Jacques Curie réussirent cependant à mettre en évidence le phénomène prévu. Un des résultats intéressants de cet ensemble d'études fut l'invention d'un appareil de mesure à la fois très curieux et très précis, le quartz piézo-électrique, qui n'est pas autre chose qu'un cristal de quartz que l'on peut comprimer à volonté au moyen d'un poids ; il en résulte un dégagement connu de charges électriques, qui peut servir à compenser une charge électrique que l'on veut mesurer. L'emploi de cet appareil est resté quotidien

dans le laboratoire que Curie animait de son génie et lorsqu'en 1896 commencèrent les études difficiles qui devaient conduire à la découverte du radium, le quartz piézo-électrique, associé avec l'électromètre que Curie avait perfectionné, fut l'instrument de mesure constamment employé.

Ces études sur les propriétés des cristaux devaient amener Pierre Curie à réfléchir sur la symétrie, d'une manière générale, dans les phénomènes physiques, et, en 1894, à énoncer ce qu'il a appelé le « principe de symétrie », qui permet de prévoir que certains phénomènes peuvent ou ne peuvent pas se produire par la simple considération de la symétrie qui résulte des données.

**L A THÉORIE MOLÉCULAIRE
DES CRISTAUX. — BRAVAIS**

Les découvertes dont on vient de parler étaient indépendantes de toute hypothèse concrète sur la constitution intime des cristaux ; cela était conforme à l'esprit régnant pendant la période moyenne du dix-neuvième siècle, où la physique avait une tendance à se désintéresser des hypothèses sur la constitution de la matière, et en particulier regardait avec quelque méfiance tout ce qui touchait à l'hypothèse moléculaire. Il n'en est que plus remarquable de voir surgir pendant cette période les travaux de Bravais qui se rattachent directement à cette hypothèse.

Entré à l'École polytechnique en 1829, Bravais en était sorti comme officier de marine, mais ne tarda pas à se tourner vers la science. En 1844, il était déjà professeur de physique à l'École polytechnique. Ses premières recherches furent consacrées à l'optique des phénomènes atmosphériques, qui, depuis la belle théorie de l'arc-en-ciel de Descartes, complétée par Newton, avaient donné lieu à plus de descriptions que d'études scientifiques. Bravais s'attache particulièrement au phénomène du halo, qui présente des apparences si curieuses et si variées. Dans plusieurs mémoires publiés de 1845 à 1847, Bravais montre que ces apparences s'expliquent dans leurs moindres détails par les réflexions et réfractions que font subir à la lumière du soleil de minuscules cristaux de glace suspendus dans la haute atmosphère. Les recherches ultérieures sur cette question n'ont pu qu'ajouter bien peu de chose à l'analyse donnée par Bravais.

Presque aussitôt, Bravais entreprend ses célèbres études sur la constitution des cristaux. Ses idées dérivent directement de l'hypothèse moléculaire, mais, tandis que dans un liquide ou dans un corps non cristallisé, on est amené à regarder les molécules comme distribuées sans ordre, comme au hasard, Bravais admet que dans un cristal elles sont régulièrement placées, de telle manière que si l'on joint par une ligne droite deux molécules voisines, on en trouve une troisième, puis une quatrième, et ainsi

de suite, toutes alignées et à égales distances, l'ensemble formant ce que l'on a appelé un *réseau cristallin*. Dans une série d'études mathématiques, publiées de 1849 à 1851, Bravais étudie complètement les propriétés géométriques d'un tel ensemble, et montre que la symétrie que l'on trouve dans la nature pour les divers cristaux s'explique admirablement en supposant une telle structure, les différents « systèmes cristallins » se distinguant par la symétrie que possède le réseau. Naturellement, Bravais ne peut donner aucune indication sur la dimension des molécules et sur les distances qui les séparent ; on était encore à un demi-siècle de l'avènement de la physique moléculaire concrète, qui compte les molécules et en détermine les dimensions ; Bravais ne fait que de la géométrie, mais cette géométrie eut une influence considérable sur les progrès de la cristallographie, et a servi de base à la plupart des études modernes. Plus de soixante ans plus tard, le réseau cristallin devait être mis en évidence d'une manière directe par la belle découverte de Laue sur l'action qu'exercent les cristaux lorsqu'ils reçoivent un faisceau de rayons X. On peut affirmer aujourd'hui que le réseau imaginé par Bravais était bien une réalité, et l'on arrive à y fixer la distance qui sépare les diverses molécules et même la position de chaque atome dans la molécule qui occupe chaque nœud du réseau. La cristallographie est alors entrée dans une ère nouvelle, dont Bravais aura été le brillant précurseur.

IX

LES APPLICATIONS

RAPPORTS RÉCIPROQUES DE LA SCIENCE ET DES APPLICATIONS L'époque que nous étudions en ce moment restera comme celle du grand développement des applications de la science. L'époque contemporaine en a vu naître de très brillantes, mais c'est la partie moyenne du dix-neuvième siècle qui a vu la grande révolution apportée dans les conditions de l'existence par l'emploi des nouveaux moyens d'action. On ne peut avoir la prétention d'écrire ici l'histoire de cette transformation ; on doit se borner à la considérer dans ses rapports avec les progrès de la physique. Rapports réciproques, car si la recherche scientifique désintéressée a été parfois suivie d'applications absolument imprévues, inversement, l'application a été très souvent l'occasion d'importantes découvertes scientifiques, soit en mettant aux

maines des savants de nouveaux moyens de recherches, comme ce fut le cas après le développement de l'industrie électrique, soit en attirant l'attention des ingénieurs sur les principes de leur art et donnant aux savants des sujets d'études auxquels ils n'auraient jamais pensé. C'est ainsi que la fondation de la thermodynamique par Sadi Carnot a été incontestablement une conséquence du développement de la machine à vapeur, appareil qui devait à son tour, mais beaucoup plus tard, profiter largement de la nouvelle science pour son perfectionnement. C'est, en grande partie, au développement de l'industrie que nous devons l'organisation actuelle de nos laboratoires.

**L E GRAND DÉVELOPPEMENT DE LA MACHINE
A VAPEUR ET DE SES APPLICATIONS**

En 1825, la machine à vapeur était arrivée déjà à une grande perfection, mais ses applications étaient encore relativement limitées ; elle allait, en quelques décades, conquérir le monde.

Après de brillants essais en France, la navigation à vapeur allait nous revenir d'Amérique, où Fulton avait enfin réussi à réaliser ses idées, et d'Angleterre où l'on avait suivi ses traces. Après le retour des Bourbons, le marquis de Jouffroy rappela l'attention sur ses anciens essais, et cette fois ses idées ne pouvaient plus être traitées de chimères. En 1816, un navire construit sur ses plans était lancé à Paris et fit des essais satisfaisants ; cependant, les droits de Jouffroy furent contestés judiciairement et il ne put tirer aucun bénéfice de son invention. La même année, un bateau à vapeur français traversait la Manche, ce qui fut considéré comme un exploit extraordinaire. Ce n'est qu'en 1838 que l'Atlantique fut traversé, presque en même temps, par deux navires à vapeur, tous deux anglais.

**L ES CHEMINS
DE FER.**

Les moyens de transports sur terre allaient, à leur tour, subir un bouleversement bien plus important et bien plus rapide, par l'invention et le développement des chemins de fer.

Au début, les hommes de science ne furent à peu près pour rien dans la réalisation de cette idée très simple ; elle fut surtout l'œuvre de bons ouvriers et d'industriels avisés. C'est incontestablement à l'Angleterre, qui avait une avance considérable dans l'art de la construction de la machine à vapeur, que revient l'honneur d'avoir inauguré, d'une manière pratique, la traction à vapeur sur voie ferrée ; c'est au voisinage de ses mines que les premiers essais réussirent aux environs de 1820. Une fois l'époque héroïque passée, les ingénieurs savants commencèrent à intervenir avec succès.

En France, la première voie ferrée fut celle de Saint-Étienne à Lyon, qui fut commencée en 1826, sous la direction de Marc Seguin, neveu de Montgolfier, l'un des hommes qui ont le mieux compris l'importance du développement des moyens de transport. Des essais de navigation à vapeur sur le Rhône avaient déjà conduit Seguin à l'invention de la chaudière tubulaire qui, bientôt appliquée à la locomotive encore dans l'enfance, allait donner à cette machine la puissance et la vitesse qui lui manquaient. En 1829, deux locomotives achetées par Seguin aux ateliers de Stephenson à Manchester, firent leur apparition en France. Les Anglais étaient en avance sur nous ; la première voie ferrée de grande longueur, celle de Manchester à Liverpool (environ trois cents kilomètres), fut mise en exploitation dès 1830, tandis qu'en France la voie ferrée de Lyon à Saint-Étienne restait seule en service pendant plusieurs années ; et encore l'exploitation y était-elle faite d'une manière assez bizarre, en partie par des chevaux, en partie au moyen de câbles et en partie au moyen de locomotives. La ligne d'Alais à Beaucaire, établie surtout pour le transport du charbon de la mine au Rhône, fut commencée en 1833. La première ligne destinée surtout au transport des voyageurs fut celle de Paris à Saint-Germain (20 kilomètres) qui fut inaugurée en 1837. La loi autorisant sa construction n'avait été votée qu'après une vive discussion dans laquelle plusieurs des membres les plus éminents de la Chambre des députés ne firent pas preuve d'une grande perspicacité. Arago, ordinairement plus judicieux, combattit énergiquement le projet par des arguments dont quelques-uns nous paraissent enfantins. Un tunnel de quelques centaines de mètres lui paraissait devoir être un grand danger pour les voyageurs qui, à cause de l'écart de température entre l'extérieur et l'intérieur du souterrain, seraient exposés à « gagner des fluxions de poitrine, des pleurésies, des catarrhes ». Thiers, alors ministre des Travaux publics, exposa que les chemins de fer pouvaient rendre quelques services, mais seulement pour les transports sur de petites distances, et qu'ils ne pourraient jamais servir à établir des relations régulières entre des villes éloignées.

Le projet fut cependant voté, et lorsque tous les Parisiens eurent utilisé le nouveau mode de locomotion pour leurs promenades du dimanche, il devint difficile de prétendre que l'emploi des chemins de fer fût impraticable ou dangereux. A partir de ce moment, la cause était gagnée, et les constructions se développèrent rapidement. Leur histoire est alors surtout une affaire de travaux publics, d'administration et de finances. La locomotive se perfectionna progressivement, d'une manière continue, chaque nouveau type montrant quelque amélioration par rapport aux précédents. Dans les vingt ans de 1840 à 1860, toute la technique des chemins de fer était créée.

Le besoin de matériel amena un énorme développement de l'industrie métallurgique, que le nouveau moyen de transport rendait en même temps possible.

L ES GRANDS TUNNELS. EMPLOI
DE L'AIR COMPRIMÉ

Parmi les grands événements auxquels donna lieu le développement des chemins de fer, on ne peut passer sous silence le premier percement des Alpes par la construction du tunnel du mont Cenis, reliant la France et l'Italie. L'idée en était venue alors que la Savoie était encore réunie au royaume de Piémont. Dès 1857, le colonel (plus tard général) Menabrea, qui représentait le collège électoral de Saint-Jean-de-Maurienne au Parlement de Turin (et qui devait, plus tard, occuper brillamment le poste d'ambassadeur d'Italie à Paris), défendit le projet qui avait été étudié par les ingénieurs savoisiens. Les travaux furent presque immédiatement commencés, des deux côtés des Alpes. Ils purent être menés à bien, grâce à la remarquable invention, qui rendit dans des cas analogues les plus grands services, du moteur à air comprimé, invention dont l'auteur était un ingénieur de Savoie, Germain Sommeiller. L'air, comprimé par la force motrice d'une chute d'eau, était envoyé par des tuyaux dans l'intérieur du tunnel et allait actionner les machines perforatrices, en même temps qu'il assurait la ventilation. Ce fut le premier exemple de « transport de force » à distance relativement grande, en même temps qu'une première application de l'énergie des chutes d'eau des torrents des montagnes. La libre réunion de la Savoie à la France, en 1860, ne retarda en rien les travaux ; la France poussa activement la percée du côté ouest. C'est pendant la guerre franco-allemande, le 21 décembre 1870, que les deux galeries se rejoignirent ; la première locomotive passa à travers le tunnel le 17 septembre 1871.

L E MOTEUR A
EXPLOSION

Il faut remonter jusqu'à l'invention de la poudre à canon pour trouver le premier exemple d'un effet mécanique produit par une explosion, et jusqu'à Huygens pour trouver les premiers essais en vue de la création d'un moteur utilisant le même phénomène. L'invention de la machine à vapeur détourna, pendant deux siècles, de la continuation de ces essais. C'est seulement lorsque l'on eut tiré de cet appareil ses principales applications que l'on s'avisa d'autres moyens pour produire du travail mécanique en utilisant une brusque action chimique.

En 1860, Lenoir fit connaître son *moteur à gaz*, dans lequel le travail mécanique est produit par la brusque combustion d'un mélange d'air et de gaz d'éclairage. L'invention eut des débuts modestes ; son premier effet fut de fournir de la force

motrice, dans les villes où l'on disposait d'une distribution de gaz d'éclairage, à de petits ateliers pour qui l'emploi d'une machine à vapeur, avec sa chaudière et son foyer, eût été une trop grande complication. L'avenir du moteur à explosion devait être d'une bien autre importance. Lenoir avait déjà remarqué que son moteur pouvait être alimenté, au lieu de gaz d'éclairage, par des vapeurs d'un liquide combustible, comme le pétrole dont l'usage commençait à se répandre pour l'éclairage ; le moteur devenait ainsi autonome, indépendant de toute distribution urbaine. Il fallut plus de vingt ans pour que cette idée si simple commençât à porter ses fruits.

Après quelques perfectionnements, où les progrès de la métallurgie étaient nécessaires, le moteur à explosion donna enfin la solution du grand problème du moteur léger, dont l'absence avait arrêté l'essor de tant d'idées ingénieuses. L'automobile, le ballon dirigeable, l'avion, le sous-marin, n'attendaient que le moteur à explosion pour faire leur entrée dans le monde ; ce fut la période contemporaine, à partir de 1890, qui en vit le développement.

LES GRANDES CONSTRUCTIONS MÉTALLIQUES Au commencement du dix-neuvième siècle, les matériaux employés dans les constructions étaient restés, traditionnellement, la pierre et le bois. Même dans les quelques machines employées dans les métiers, le bois restait la matière la plus employée ; on économisait le métal à cause de son prix. Diverses circonstances avaient cependant obligé les techniciens à perfectionner l'emploi du métal ; les anciennes horloges étaient en bois, mais on avait déjà dû construire entièrement en métal les appareils, déjà très parfaits, du dix-huitième siècle ; les débuts de la machine à vapeur (bien que l'on eût fait quelques essais avec des cylindres en bois construits comme un tonneau) avaient aussi donné l'occasion d'élargir l'emploi du métal, surtout en Angleterre où ces machines étaient presque exclusivement construites.

C'est aussi en Angleterre que furent réalisées les premières grandes constructions où le métal jouait un rôle important ; les ponts suspendus, ces curieux ouvrages qui semblent comme tenus par un fil, en furent un des premiers exemples. En 1821 et 1823, le gouvernement français envoya en Angleterre, pour étudier ces nouvelles constructions, un de ses meilleurs ingénieurs, Navier, qui commençait ses belles recherches sur la théorie de l'élasticité. Navier publia à son retour un mémoire qui est un véritable traité des ponts suspendus. En 1824, il avait été chargé de construire sur la Seine, dans l'axe de l'hôtel des Invalides, un pont suspendu, avec une portée de cent cinquante-cinq mètres ; c'était un beau travail pour le début d'un mode de construction dans notre pays. Le pont était presque terminé en 1826 ; tout le

monde admirait l'habileté technique du constructeur, mais les avis furent très partagés sur son effet décoratif ; beaucoup trouvèrent que la perspective d'aspect classique du monument de Mansart s'accommodait mal du voisinage de cette construction dont la légèreté paraissait étrange. Un léger tassement qui se produisit

dans un des contreforts en maçonnerie servit de prétexte pour ordonner la démolition du pont à peine fini. Navier, qui avait mis toute sa science dans cette construction, ne put se consoler de cet échec. Ce furent les frères Seguin, neveux des Montgolfier, qui, après Navier, reprirent en France la construction des ponts suspendus, d'abord à Annonay, puis sur le Rhône entre Tain et Tournon. La nouvelle construction, peu coûteuse, se répandit rapidement en France où les ponts étaient encore assez rares ; beaucoup de bacs furent, en un petit nombre d'années, remplacés par des ponts suspendus.

Ce mode de construction où tout l'effort est supporté par des fils eut, dans le cours du dix-neuvième siècle, plusieurs autres applications. On citera seulement les câbles transporteurs, établis en bien des endroits de nos montagnes ; une mention plus détaillée doit être faite de ces curieux *ponts transbordeurs*, qui ont été établis par M. Arnodin dans plusieurs de nos ports, et qui permettent aux



LA TOUR EIFFEL

véhicules la traversée d'une rivière sans que la navigation en soit aucunement gênée. La nacelle qui porte, au niveau de l'eau, les voyageurs et les véhicules, est suspendue par des câbles à un chariot qui roule sur le tablier d'un véritable pont suspendu, placé à une hauteur assez grande pour que les plus hauts voiliers puissent passer par dessous.

Les constructions métalliques rigides datent aussi du début du dix-neuvième

siècle ; elles ont commencé par les ponts, d'abord en fer forgé, puis en fonte, enfin en acier coulé, suivant les progrès de la technique métallurgique. La construction des chemins de fer, à partir de 1840, fut l'occasion du grand développement de ces constructions ; le fer y apparaît d'abord comme auxiliaire de la pierre, et s'affranchit peu à peu de cette tutelle, en même temps que les portées s'accroissent de plus en plus. Tandis qu'en Amérique et en Angleterre, on employait encore souvent le bois pour les ponts des voies ferrées, en France, où nos ingénieurs savants ne voulaient rien laisser que de définitif, on s'orienta tout de suite vers la pierre et le métal, et c'est chez nous que, dans la seconde moitié du dix-neuvième siècle, furent réalisés les plus beaux ouvrages métalliques. Il suffira de citer le pont de Garabit, dans le Cantal, construit vers 1880, qui franchit une distance de cinq cent soixante-quatre mètres sur une seule arche, à cent vingt-deux mètres au-dessus du fond de la vallée. L'usage du métal avait déjà de beaucoup dépassé son emploi spécial dans les ponts. Quelques belles constructions métalliques étaient présentées à l'Exposition de 1889 ; la tour Eiffel, remarquable moins par sa hauteur que par les belles arches qui supportent la première plate-forme, la Galerie des machines avec son vaisseau de 114 mètres d'ouverture en sont des exemples que tout le monde connaît.

Pour ces travaux, la science avait fourni à l'art de l'ingénieur des moyens de travail sans lesquels bien des constructions eussent été impossibles. Il suffira de citer ici l'emploi de l'air comprimé pour les fondations sous l'eau, et de la congélation pour le travail dans les terrains humides et mouvants.

L'ÉLECTRICITÉ ET LE TÉLÉGRAPHE La science pure avait eu peu d'influence sur le développement de la machine à vapeur et des chemins de fer. Le développement des applications de l'électricité va nous montrer un exemple tout inverse. L'électricité était une science bien avant de devenir une industrie ; Coulomb, Ampère et Faraday ont précédé de beaucoup Gramme et Siemens, tandis que Watt a précédé Carnot, Joule et Regnault. L'électricité est un exemple d'une science qui a créé une industrie ; on peut presque dire que la machine à vapeur représente une industrie qui a créé une science.

Les premiers effets constatés dans l'étude des phénomènes électriques ont été des effets mécaniques. Cependant, ces effets étaient si petits que l'on ne pouvait guère songer à les utiliser pour effectuer un travail de quelque utilité pratique. L'échange de signaux était la seule application possible. L'idée en vint même avant l'invention de la pile, à l'époque où les phénomènes électrostatiques étaient seuls connus ; un appareil d'essai fut réalisé dès 1774 par le physicien genevois Lesage,

permettant de communiquer à peu de distance au moyen de fils métalliques que l'on mettait en contact par une de leurs extrémités avec une machine électrique et dont l'autre extrémité attirait une balle de sureau. L'idée était ingénieuse ; elle eût été impraticable sur des distances notables.

L'invention de la pile, puis la découverte des phénomènes électromagnétiques, allait donner des moyens de communication beaucoup plus réalisables. Ampère lui-même en eut l'idée. Dans son premier mémoire sur l'électromagnétisme, écrit en 1820, quelques mois à peine après la découverte d'Ørsted, il s'exprime ainsi : « ...On pourrait, au moyen d'autant de fils conducteurs et d'aiguilles aimantées qu'il y a de lettres, et en plaçant chaque lettre sur une aiguille différente, établir à l'aide d'une pile placée loin de ces aiguilles, et qu'on ferait communiquer alternativement par ses deux extrémités à celles de chaque conducteur, former une sorte de télégraphe propre à écrire tous les détails qu'on voudrait transmettre, à travers quelques obstacles que ce fût, à la personne chargée d'observer les lettres placées sur les aiguilles. En établissant sur la pile un clavier dont les touches porteraient les mêmes lettres et établiraient la communication par leur abaissement, ce moyen de correspondance pourrait avoir lieu avec assez de facilité, et n'exigerait que le temps nécessaire pour toucher d'un côté et lire de l'autre chaque lettre. »

Il n'y avait qu'une difficulté dans l'idée émise par Ampère : l'emploi d'autant de fils qu'il y a de lettres aurait rendu coûteux et difficile l'établissement des communications à quelque distance. Il fallait transformer l'idée de manière à rendre possible sa réalisation, et créer toute une technique nouvelle pour l'établissement des lignes, l'emploi des piles, la lecture des signaux. Ce fut l'affaire de moins de quinze ans. Wheatstone en Angleterre, Steinheil en Allemagne, Morse aux États-Unis furent les pionniers de cette première application pratique de l'électricité.

En Angleterre, le télégraphe électrique commença à fonctionner, autrement que dans des expériences de laboratoire, en 1838 ; il servait alors uniquement d'auxiliaire aux lignes de chemins de fer, pour la transmission des ordres de service. Ce n'est qu'en 1846 que se fonda à Londres une compagnie puissante qui se proposait de mettre en communication entre elles les principales villes d'Angleterre.

Aux États-Unis, Morse, qui s'était déjà acquis quelque réputation comme peintre, commença des essais dès 1832, et arriva rapidement à l'appareil qui est encore employé, presque sans modification, de nos jours. La première ligne télégraphique américaine fut établie par lui en 1844, entre Washington et Baltimore (environ soixante kilomètres) et presque aussitôt de Washington à New-York.

La France se trouvait, en face de cette nouvelle invention, dans une situation tout

à fait particulière. Berceau de la télégraphie aérienne, notre pays avait l'avantage d'un vaste réseau de communications optiques, qui permettait la transmission rapide de tous les documents officiels entre Paris et les principales villes de France. Aucun autre pays au monde ne possédait une organisation analogue. Il en résulta que la France eut un besoin moins urgent que les autres pays d'établir la télégraphie électrique. De plus, nous avions déjà un corps d'ingénieurs télégraphistes pour le service aérien ; ces ingénieurs n'eussent pas été des hommes s'ils n'avaient pas estimé que le mode de communication dont ils étaient chargés serait difficilement remplacé par un autre. Il en résulta que la télégraphie électrique fut accueillie chez nous d'abord avec une certaine indifférence. C'est seulement en 1844 que l'on fit les premiers essais, uniquement pour le service des chemins de fer, entre Paris et Mantes, puis entre Paris et Rouen. Ce n'est qu'en 1846 que fut décidée la construction de la ligne électrique de Paris à Lille ; on imposa comme condition que la ligne électrique suivrait la ligne des postes optiques, et le télégraphe optique fut maintenu en service à cause des accidents possibles du système électrique. Pour accentuer encore la subordination du nouvel appareil à l'ancien, l'administration avait exigé que le récepteur du télégraphe électrique eût exactement la forme, en miniature, et le mode d'inscription du télégraphe de Chappe. C'était un tour de force que l'on demandait au constructeur ; il fut réalisé par Breguet, et le télégraphe électrique, malgré tous ces obstacles, fonctionna régulièrement. C'est seulement en 1850, à la suite d'un lumineux rapport du grand astronome Leverrier, que l'on décida de construire un plus grand nombre de lignes électriques, et que le public fut admis à se servir du nouveau mode de transmission.

L E TÉLÉPHONE Le télégraphe était à peine entré dans la pratique que déjà on pouvait entrevoir l'avènement du téléphone. Dès 1854, un modeste employé du télégraphe, Charles Bourseul, fait les premiers essais de transmission des sons par le courant électrique, au moyen d'appareils qui diffèrent peu du téléphone actuel. Il ne réussit pas à transmettre la parole articulée, et abandonna ses recherches, dont les résultats encore imparfaits eurent cependant un certain retentissement et furent publiés ; ils étaient probablement connus des inventeurs Elisah Grey et Graham Bell qui, en 1876, donnèrent la première solution complète du problème.

En même temps, le télégraphe lui-même recevait peu à peu les perfectionnements qui en ont fait une merveille d'ingéniosité. Sans entrer dans le détail de ces appareils, on ne peut omettre de citer le plus remarquable d'entre eux, l'appareil multiple de

Baudot, dont l'inventeur était, lui aussi, un modeste employé de notre administration des télégraphes, appareil qui permet d'envoyer simultanément, sur un même fil, six télégrammes dans chaque sens. Imaginé en 1874, bientôt mis en service sur le réseau français, l'appareil de Baudot est ensuite devenu d'un emploi universel dans toute l'Europe.

LES DÉPÔTS ÉLECTRO-CHIMIQUES L'industrie des échanges de communications avait été la première à profiter des ressources qu'offre le courant électrique, parce qu'elle n'exige qu'une dépense d'énergie presque infinitésimale. On n'osait pas, bien que l'on eût en main tous les éléments nécessaires, se lancer dans les grandes applications, et ce n'est qu'après 1870 que les possibilités de grandes puissances commencèrent à être comprises ; la doctrine de l'énergie n'était pas encore, si l'on peut dire, entrée dans les mœurs, et d'autre part le courant électrique devait apparaître comme un auxiliaire bien délicat pour la grande industrie. Cependant, avant les grandes applications modernes, s'était déjà créée l'industrie des dépôts électrochimiques et de la galvanoplastie. Dans la longue série de perfectionnements d'une technique délicate et variée, il faut citer spécialement le nom de Henri de Ruolz. D'abord compositeur de musique (plusieurs pièces de lui furent jouées avec succès), Ruolz fut plus tard obligé de se tourner vers l'industrie, et en 1841 il indiquait, avec l'Anglais Elkington, les procédés encore en usage pour recouvrir les objets métalliques d'une couche d'or ou d'argent et ouvrait la voie à une industrie fort importante.

A l'électrochimie se rattache également l'invention de l'accumulateur faite dès 1860 par un amateur de génie, G. Planté. L'inventeur devançait de beaucoup son temps ; on avait l'accumulateur avant d'avoir une dynamo pour le charger ; l'appareil dut attendre vingt ans les véritables applications industrielles, et il se trouva tout prêt le jour où l'on eut besoin de lui. Son emploi donna bien lieu à quelques déceptions, tenant à ce que l'on n'avait pas parfaitement compris au début ce que l'on pouvait lui demander ; il n'en rendit pas moins de très grands services à l'industrie électrique.

L'ARC ÉLECTRIQUE ET LES PHARES Observé pour la première fois par Davy, qui l'avait produit au moyen d'une puissante pile de Volta, le beau phénomène de l'arc électrique avait excité l'admiration de tous ceux qui l'avaient vu. Le perfectionnement des piles, par Becquerel, puis par Grove et par Bunsen, rendit relativement facile sa production ; vers 1844, on commença à s'en servir dans des

expériences de laboratoire pour remplacer la lumière solaire, et Foucault fut l'un des premiers à faire une application de ce genre lorsqu'il s'occupait de micrographie avec le docteur Donné. C'est à cette époque que Foucault fit construire le premier « régulateur » pour donner de la fixité à la lumière en rapprochant automatiquement les charbons dès qu'ils commencent à s'user. De loin en loin, à l'occasion de fêtes ou de spectacles, des essais d'éclairage public étaient réalisés ; ils soulevaient une admiration qui montre surtout que l'on était peu habitué alors à un éclairage intense. Chacun de ces essais exigeait l'installation d'une incommode batterie de piles, qui ne pouvait fonctionner que pendant un petit nombre d'heures. Tant que l'on en était là, l'arc électrique ne pouvait être qu'un objet de luxe ou de curiosité. C'est son application aux phares qui obligea à perfectionner les moyens de production du courant électrique, et qui ouvrit la voie aux grandes applications modernes de l'électricité.

Notre service des phares qui, depuis Fresnel, était animé d'un esprit scientifique remarquable, avait suivi avec intérêt les progrès de la lampe à arc. Cette lumière présentait, pour les phares, des avantages évidents, dus à la grande intensité du flux lumineux émis, et plus encore à la petitesse de la source de lumière, réduite presque à un point. Malheureusement, la nécessité de se servir d'une batterie de piles était inacceptable pour un service qui ne peut souffrir la moindre interruption accidentelle. C'est alors que l'idée vint que l'on pourrait employer les courants d'induction, découverts par Faraday. Il existait déjà de petites machines, simples appareils de laboratoire, qui produisaient du courant électrique de cette manière ; il ne s'agissait que de les rendre beaucoup plus puissantes. Des essais encourageants avaient été faits en Angleterre dès 1859. En France, le nouveau mode d'éclairage fut appliqué pour la première fois au phare de la Hève, près du Havre. Le courant électrique était engendré par une machine magnéto-électrique, basée sur le même principe que la machine réalisée sur les indications d'Ampère dès 1832 ; pour la construction de cette machine, des ateliers avaient été créés à Paris par une compagnie qui prit le nom de « compagnie l'Alliance », et dont le personnel était, en partie, d'origine belge. Ce fut le berceau de la construction industrielle des appareils électriques ; Gramme, un simple ouvrier, né en Belgique et employé à Paris dans cette usine, y apprit les éléments d'un métier encore nouveau, avant de révolutionner la technique électrique naissante et de fonder lui-même une puissante industrie.

LA DYNAMO ET LE MOTEUR ÉLECTRIQUE

C'est à un savant italien, Paccinotti, que revient incontestablement l'honneur d'avoir découvert la forme moderne de la machine qui sert à produire le courant électrique ; dans un mémoire

publié en 1864, il décrit l'induit en forme d'anneau, et insiste sur la *réversibilité* de son appareil, c'est-à-dire sur son aptitude à servir indistinctement d'appareil producteur de courant électrique, ou de moteur lorsque ce courant lui est fourni. Le mémoire de Paccinotti passa complètement inaperçu ; Gramme, en 1869, réinventa le même appareil et s'employa à le faire passer dans la pratique, sans s'arrêter aux objections que lui faisaient les savants auxquels il avait essayé de le présenter. En quelques années, la *dynamo* était créée, ainsi que le *moteur électrique*. A vrai dire, le moteur électrique n'était pas alors une nouveauté ; de nombreux appareils de cette espèce avaient été construits, et notre Exposition universelle de 1855 en contenait un grand nombre, en particulier ceux de Froment, l'habile collaborateur de Foucault. A propos de cette exposition, Tresca faisait déjà quelques mesures de puissance au moyen du frein de Prony. Mais ces moteurs étaient alimentés au moyen de piles, et personne n'avait aperçu quelle serait leur utilité pour le *transport de force* ; à l'Exposition de 1867 on constate, dit l'auteur d'un ouvrage de vulgarisation de l'époque, « le discrédit complet dans lequel le moteur électrique est tombé dans l'intervalle de douze ans ». On était à l'époque du triomphe de la vapeur ; douze autres années suffirent pour que la situation fût complètement changée.



GRAMME

LE TRANSPORT ÉLECTRIQUE DE L'ÉNERGIE. LA HOUILLE BLANCHE

L'invention de Gramme appela tout de suite l'attention sur la possibilité du transport de force par le courant électrique. A partir de 1878, l'idée était dans l'air, avec des notions parfois un peu vagues sur les conditions du succès. L'un des premiers, Marcel Deprez arrive à les préciser et, vers 1881, les essais commencent à donner des résultats vraiment intéressants. C'est de cette époque que date le grand développement de l'industrie électrique ; une exposition d'électricité ouverte à Paris en 1881 au palais de l'Industrie (près des Champs-Élysées) soulève dans le public un véritable enthousiasme ; un tramway électrique, qui parcourt à une vitesse bien modeste les quelques centaines de mètres séparant la place de la Concorde de

l'exposition, apparaît avec raison comme le début d'une ère nouvelle. La véritable mission sociale du courant électrique, sa merveilleuse aptitude non pas à créer mais à transporter la puissance motrice, éclataient à tous les yeux, et l'on commençait à apercevoir la possibilité d'utiliser les diverses sources d'énergie non plus seulement à l'endroit de leur production mais aussi en leur lieu d'utilisation le plus favorable.

L'emploi industriel des chutes d'eau n'était certes pas une nouveauté ; nous avons vu l'importance des travaux des hydrauliciens du dix-huitième siècle, et l'une de leurs préoccupations principales était l'aménagement des diverses sortes de moulins. Avant l'introduction de la machine à vapeur, la force de l'eau, avec celle du vent, était même la seule qui pût remplacer l'effort musculaire de l'homme et des animaux. Peu à peu, un grand nombre de « sauts d'eau » de nos rivières avaient été utilisés pour les besoins de l'industrie naissante ; ils actionnaient les moulins à moudre le blé, les scieries, les fabriques de poudre, les usines métallurgiques. La localisation de beaucoup de ces industries dans nos hautes vallées s'explique par cette nécessité de la force motrice hydraulique, utilisée d'une manière encore bien modeste, car rarement la puissance motrice dont disposait une usine dépassait une cinquantaine de chevaux.

Le développement de la machine à vapeur fit un peu oublier cette admirable source d'énergie. La possibilité d'installer l'atelier où l'on veut, avec la puissance que l'on veut, sans autre sujétion que d'y transporter le charbon, dut apparaître comme une immense simplification. L'usine du Creusot, fondée en 1774 avec le concours d'ingénieurs anglais, fut en France la première installation métallurgique affranchie de l'aide d'une chute d'eau. Dans toute la partie moyenne du dix-neuvième siècle c'est la machine à vapeur qui passe au premier plan de l'actualité.

Cependant, le moteur à eau n'était pas oublié ; l'époque même du grand développement de la machine à vapeur avait vu se produire, sans attirer l'attention du grand public, la révolution qui devait le tenir prêt pour de grandes destinées. L'ancienne roue hydraulique ne pouvait utiliser, comme hauteur de chute, que le diamètre de la roue ; la turbine, que l'on avait vue poindre dans certains moulins du dix-huitième siècle, se trouve définitivement créée vers 1850. En France, Fourneyron, Fontaine, Girard, Poncelet, contribuèrent largement à son éclosion. La grande nouveauté était la possibilité d'utiliser des dénivellations énormes, presque sans autre limite que celle imposée par la nature.

Dès 1837, Fourneyron avait aménagé une chute de 112 mètres ; on n'y fit guère attention, et l'essai resta isolé. Le coup de fouet fut donné par Aristide Bergès qui,

pour actionner sa papeterie de Lancey, près de Grenoble, utilisa une chute de 200 mètres et lui fit produire une puissance de 1 000 chevaux ; six ans plus tard, la hauteur est portée à 500 mètres et la puissance à 2 500 chevaux, utilisés encore au lieu même de leur production.

Juste à ce moment, l'industrie électrique naissante allait donner le moyen d'employer à distance ces sources d'énergie. En 1883, Marcel Deprez, poursuivant des expériences entreprises depuis quelques années, transportait de Vizille à Grenoble, sur une distance de 14 kilomètres, une puissance de 7 chevaux. Ces chiffres peuvent nous faire sourire ; mais le premier pas était fait. Le développement des réseaux électriques distribuant partout la lumière et la force, utilisant dans leurs « usines centrales » aussi bien la puissance des chutes d'eau que celle de la vapeur, qui s'entr'aident et se suppléent au besoin, tout cela n'est plus qu'une affaire de perfectionnements techniques, d'organisation industrielle et de travaux publics. Toutes ces applications de l'électricité, qui transforment les conditions matérielles de notre existence, se poursuivent depuis les quarante dernières années et sont loin d'être terminées.

L'ÆROSTATION

L'invention de Montgolfier n'avait pas donné ce que le premier élan d'enthousiasme avait fait espérer ; on avait bien vite reconnu que flotter dans l'air au gré des vents n'était pas naviguer. Du sport, des spectacles forains, quelques ascensions scientifiques sans grands résultats, sont tout ce que l'on trouve dans la première moitié du dix-neuvième siècle. Cependant, le problème de la navigation aérienne n'était pas oublié ; de loin en loin, des projets, analogues à celui de Meusnier, sont formés. Le premier essai en grand digne d'être signalé est celui que fit en 1852 Henri Giffard. Ingénieur distingué (on lui doit l'invention de l'*injecteur Giffard*, qui sert à faire pénétrer l'eau froide, malgré la pression, dans une chaudière en activité), Giffard voit clairement que le problème est lié à celui du *moteur léger* ; il construit un ballon allongé, muni d'une hélice actionnée par un moteur à vapeur d'une puissance de trois chevaux, qui, avec sa chaudière, pesait cent cinquante-neuf kilogrammes ! C'était un résultat magnifique pour l'époque ; de nos jours, ce poids est celui d'un moteur trente ou quarante fois plus puissant. L'appareil put se déplacer, en air calme, avec une vitesse de deux à trois mètres par seconde ; il ne pouvait lutter contre le moindre vent. Un second essai, plus en grand, en 1855, donna des résultats analogues, mais se termina par un accident. Giffard ne cessa cependant pas de s'intéresser à l'aérostation ; c'est lui qui construisit ces énormes ballons captifs, qui eurent un si grand succès dans plusieurs expo-

sitions universelles (Paris, 1867 ; Londres, 1868 ; Paris, 1878). Ce dernier, qui montait à une hauteur de cinq cents mètres, n'enleva pas moins de trois cent cinquante mille passagers.

Entre temps, le siège de Paris avait donné au ballon sphérique libre un regain de popularité ; soixante-huit ballons construits avec les ressources de la ville assiégée purent emporter des nouvelles de la capitale, ainsi que quelques hommes dont le départ était jugé nécessaire à la défense nationale.

C'est en grande partie sous l'empire de préoccupations militaires que le problème de la navigation aérienne fut repris. Dupuy de Lôme, ingénieur de la marine, qui avait été, vers 1848, le créateur des navires de guerre à vapeur, avait fait partie du comité de la Défense pendant le siège de Paris, et à ce titre eut à s'occuper des ballons et à réfléchir sur les moyens de les diriger. Dès 1872, il essaya un dirigeable, dans lequel il avait appliqué les idées émises près d'un siècle avant lui par Meusnier. Le ballon était muni d'une hélice que faisait tourner une équipe de huit hommes ; il put se déplacer, par rapport à l'air ambiant, avec une vitesse de dix kilomètres par heure ; c'était encore trop peu pour lutter contre le vent.

Cependant, dès 1874, on commença à s'inquiéter de l'avenir de l'aérostation pour les besoins militaires, et bientôt on décidait la création, dans le parc de Chalais, près de Meudon, d'un établissement où seraient étudiés d'une manière systématique et continue tous les problèmes pouvant intéresser l'aérostation militaire. C'était, après un siècle d'interruption, reprendre la tradition des Meusnier, des Coutelle et des Conté. Un jeune officier du génie, Charles Renard, fut mis à la tête de ce nouveau service, bientôt aidé de son frère Paul Renard et de quelques autres officiers. Une brillante série de recherches systématiques sortit de ce petit groupe d'hommes, conduisant à des perfectionnements importants dans la technique du ballon libre, du ballon captif, et enfin à la réalisation du premier ballon dirigeable capable de faire un véritable voyage aérien. Déjà en 1883 les frères Tissandier, deux vétérans de l'aéronautique, avaient pu remonter le cours du vent dans un ballon à hélice mue par un moteur électrique et une pile. Le 9 août 1884, le ballon la *France*, construit aux ateliers militaires de Chalais, réussit pour la première fois à effectuer un trajet fixé d'avance et à revenir à son point de départ. Rien n'était laissé au hasard dans la construction de ce ballon ; le moteur électrique, d'une puissance de huit chevaux, était actionné par une pile imaginée par Renard. Le navire aérien parcourut un circuit de 7 kilom. 600 et fut ramené à son point de départ. Plusieurs autres expériences furent faites avec le même succès ; le ballon vint survoler Paris et rentra sans accident à son port d'attache.

La technique du dirigeable avait, dès ce moment, trouvé ses principes essentiels, mais le moteur n'était pas encore assez puissant. Qu'est-ce qu'un moteur de huit chevaux pour actionner un dirigeable ! La vitesse ne pouvait dépasser 23 kilomètres par heure, et c'était encore insuffisant pour naviguer sauf par temps calme. Du jour où le moteur à explosion, enfin perfectionné, donna le moteur puissant et léger qui manquait à Renard, le problème fut résolu.

L ES SONDAGES ATMOSPHÉRIQUES

C'est encore à Renard que l'on doit la mise au point définitive du *ballon sonde*, dont l'emploi a révolutionné la météorologie et est devenu, depuis la dernière guerre, d'usage quotidien pour l'étude de la situation atmosphérique. L'idée de lancer un ballon libre, sans aéroneute, mais muni d'appareils que l'on observerait après la chute, est aussi ancienne que le ballon lui-même ; elle fut émise dès l'année 1783, mais n'eut aucune suite. Ce n'est qu'en 1892 que Charles Renard étudia scientifiquement le problème. La même année, Hermite lança, près de Paris, un ballon muni d'un baromètre enregistreur, qui fut retrouvé en Vendée après avoir atteint l'altitude de 9 000 mètres ; l'année suivante, on atteignit 16 000 mètres, et de nos jours, on a dépassé l'altitude de 37 000 mètres. Depuis cette époque, les *sondages de l'atmosphère*, en grande partie sous l'impulsion de Teisserenc de Bort, sont devenus fréquents, et ont conduit, sur la constitution de la haute atmosphère, à des résultats tout à fait inattendus, dont le plus curieux est l'existence d'une température presque invariable en chaque lieu (d'environ — 55 degrés dans nos régions) au-dessus d'une dizaine de kilomètres, et le fait que cette température va en s'abaissant à mesure que l'on approche de l'équateur. L'étude des courants atmosphériques, si importante pour l'aviation, a été, elle aussi, transformée par l'emploi de ces petits ballons libres ; en suivant leur marche à travers l'air au moyen d'une lunette, on peut déterminer à chaque hauteur la direction et la vitesse du vent.

L 'INDUSTRIE DU FROID

Tandis que l'élévation de température produite par la combustion est une invention remontant à une haute antiquité, ce n'est qu'à une époque toute récente que l'homme a pu disposer de moyens puissants pour abaisser la température au-dessous de celle de l'air ambiant. La conservation de glace ou de neige recueillie en hiver donnait un moyen, fort limité, pour refroidir les corps en été ; l'invention des mélanges réfrigérants à la fin du dix-septième siècle, et leur étude systématique par Réaumur vers 1730, avaient reculé un peu la

limite des basses températures, mais on était toujours tributaire des froids de l'hiver pour la production de la glace qu'il fallait conserver.

Au dix-neuvième siècle, la découverte des gaz liquéfiés donna un nouveau moyen pour atteindre les grands froids. En 1834, Thilorier, appliquant en grand les idées de Faraday, avait réussi à liquéfier et solidifier en grandes quantités le gaz carbonique, en le produisant dans un espace clos, ce qui permettait d'obtenir de hautes pressions sans appareil compresseur, difficilement réalisable à cette époque. L'évaporation de la *neige carbonique* ainsi obtenue abaissait la température au-dessous de — 100 degrés. Les expériences curieuses que l'on pouvait réaliser à ces températures très basses eurent alors un grand succès et furent répétées dans tous les cours ; mais le gaz carbonique résultant de l'évaporation était perdu et l'on ne pouvait songer à employer cette méthode, trop coûteuse, pour obtenir du froid utilisable d'une manière industrielle.

Ce n'est qu'en 1860 que l'on commença à avoir la possibilité de faire industriellement du froid, et que l'on put entrevoir le moment où la conservation de la glace recueillie en hiver deviendrait inutile ; l'ingénieur français Charles Tellier construit la première machine à produire le froid par évaporation de l'ammoniaque liquéfiée, sans perdre le gaz résultant de l'évaporation, qui est repris à l'état de dissolution. En 1867, Tellier réalisait la première machine frigorifique à compression où le même gaz (ammoniac ou oxyde de méthyle) était successivement liquéfié par compression, évaporé, liquéfié de nouveau, de manière à subir indéfiniment le même *cycle* de transformations sans perte de substance et sans autre dépense que du travail mécanique. Ainsi était réalisé l'appareil sur lequel est basée toute l'industrie frigorifique actuelle. Dès 1870, Tellier avait établi à Auteuil une machine qui fabriquait de la glace artificielle. Mais l'inventeur avait déjà vu un avenir beaucoup plus vaste ; en 1862, il avait déjà commencé des expériences sur la conservation des substances alimentaires par le froid ; il voyait la possibilité de transports lointains de denrées périssables, et jusqu'à la possibilité d'alimenter l'Europe avec de la viande importée de l'Amérique du Sud où le bétail est surabondant. Après bien des essais et bien des déboires dont l'histoire ne peut trouver place ici, l'idée est enfin entrée dans la pratique. On sait quelle en est aujourd'hui l'importance ; c'est toute l'alimentation de la population des villes qui se trouverait compromise si l'industrie du froid venait à nous faire défaut pour le transport et la conservation des denrées. L'art de l'ingénieur lui-même a profité de ce nouveau moyen d'action ; pour les travaux à faire dans les terrains humides et mouvants, il n'est pas rare d'en voir congeler l'eau, pour transformer un sol mobile en un terrain que le pic et la mine peuvent attaquer.

On ne cherche pas, dans ces diverses applications, à obtenir de très basses températures ; quelques degrés au-dessous de zéro y suffisent largement. Cependant, les recherches de laboratoire (en partie inspirées par les idées de Tellier) poussaient de plus en plus loin la limite des basses températures. Il était à prévoir que ce nouveau domaine offrirait, à son tour, quelques applications utiles. C'est surtout à Georges Claude, à partir de 1900, que l'on doit l'utilisation des grands froids dans l'industrie. Réalisant d'une manière pratique et économique la liquéfaction des gaz de l'air, Claude arrivait à les séparer les uns des autres par distillation, à peu près comme les bouilleurs de cru séparent l'alcool de l'eau. Ce sont surtout les industries chimiques qui ont profité de cette application hardie des lois de la physique ; la mise en œuvre de ces nouvelles méthodes est loin d'être terminée et peut nous réserver encore des surprises.

LA PHOTOGRAPHIE L'invention de la photographie mérite une place à part dans l'histoire des sciences expérimentales, à cause surtout des puissants moyens d'investigation qu'elle a fournis à tous ceux qui observent ou expérimentent.

Il faut remonter très loin pour trouver les premiers faits susceptibles de conduire à la fixation des images lumineuses. Au seizième siècle, on savait déjà que l'*argent corné* (chlorure d'argent) noircit lorsqu'on l'expose au soleil, et cette propriété fut bien des fois utilisée pour des tentatives de fixation d'une image ou d'une silhouette. Dans ses cours de physique, qui avaient un si grand succès à la fin du dix-huitième siècle et au début du dix-neuvième, Charles montrait un papier, dont la préparation ne nous est pas connue, qui noircissait à la lumière, ce qui lui permettait de reproduire l'ombre d'un profil ; image d'ailleurs fugitive, car il n'avait pas le moyen de l'empêcher de noircir sous l'action de la lumière. Au début du dix-neuvième siècle, quelques tentatives étaient faites en Angleterre pour utiliser les propriétés des sels d'argent ; le problème de la photographie était posé, mais la plupart des savants avaient peu d'espoir dans la possibilité d'une solution satisfaisante. Ce furent deux amateurs, Niépce et Daguerre, qui arrivèrent à le résoudre.

Nicéphore Niépce, né en 1765 à Chalon-sur-Saône, était le fils d'un receveur des consignations au bailliage de Chalon qui lui laissa quelque fortune. Après avoir pris part comme officier aux premières guerres de la Révolution, il fut administrateur du district de Nice, puis se retira dans son pays natal où, avec son frère Claude, il s'occupa de réaliser des idées qui devançaient de beaucoup leur temps. Les deux frères méritent d'être rangés parmi les premiers inventeurs du moteur à explosion ;

ils devançaient même l'époque actuelle, car ils cherchaient à employer un combustible pulvérulent, et l'on sait que l'invention du moteur à explosion utilisant du charbon pulvérisé est encore un des problèmes de notre époque. L'invention venait trop tôt ; malgré un commencement de succès, elle ne put conduire à un résultat pratique.

La lithographie était alors une invention récente qui avait un très grand succès comme moyen de vulgarisation des chefs-d'œuvre de l'art du dessin. Nicéphore Niépce eut cette idée qu'un grand progrès serait accompli si l'on pouvait reproduire un dessin ou une gravure sans nouvelle intervention du dessinateur ; dès ses premiers essais, il nomme *héliogravure* le procédé auquel il est arrivé, et qui ne comporte pas l'emploi de la chambre noire, le dessin à reproduire étant appliqué directement sur la pierre où l'image doit être imprimée. Presque en même temps, il s'occupe de la reproduction des images par la chambre noire, et dès 1816, il parvient à obtenir les premiers résultats, mais non à fixer l'image obtenue. Poursuivant à la fois ces deux problèmes, Niépce arrive, en 1822, à obtenir des *héliographies* déjà très remarquables ; mais sa plaque était trop peu sensible pour se prêter à la reproduction du paysage, même inanimé, dont l'éclairage aurait subi de trop grands changements pendant les longues heures de l'exposition.

Bientôt après, un peintre décorateur de talent, Daguerre, commença à s'occuper du même problème. Daguerre s'était fait connaître par des décorations théâtrales très remarquées ; en 1822, il établit, près de ce qui est aujourd'hui la place de la République, le diorama, où l'on montrait des décors représentant des paysages ou des monuments célèbres, tels que le mont Blanc, Saint-Pierre de Rome, etc. Le succès fut immense, et les recettes considérables. Dans un laboratoire qu'il avait installé chez lui, Daguerre commença de son côté à chercher le problème de la fixation de l'image de la chambre noire ; il n'était pas arrivé à grand'chose lorsqu'il eut connaissance des résultats obtenus par Niépce, et lui proposa une association, qui fut conclue en 1829, par un acte passé devant notaire.

Niépce mourut en 1833, avant que l'association ait porté ses fruits ; elle eut du moins ce résultat de mettre les procédés du premier inventeur entre les mains d'un homme actif et avide de succès. Daguerre continua seul ses recherches ; cinq ans plus tard, il réussissait à obtenir ces merveilleuses images sur métal que l'on nomma bientôt *daguerréotypes*. L'heureux inventeur eut cette bonne fortune de trouver chez Arago un admirateur enthousiaste, qui sut apercevoir l'importance scientifique de la nouvelle découverte ; en la faisant connaître à l'Académie des sciences, il ne manqua pas d'insister sur le « moyen d'investigation précieux » qui venait d'être

découvert. C'est grâce à Arago que ce moyen d'investigation put, immédiatement, tomber dans le domaine public ; sur son initiative, le Parlement accorda une pension viagère à Daguerre ainsi qu'au fils de Niépce, à la condition que tous les détails du procédé seraient immédiatement publiés.

Les plaques de Daguerre étaient encore trop peu sensibles pour beaucoup d'applications. Deux ans plus tard, en 1841, Fizeau débutait dans la carrière scientifique par d'importants perfectionnements de la nouvelle technique, rendant possible le portrait. Peu de temps après, l'Anglais Talbot, poursuivant des recherches entreprises avant l'invention de Daguerre, réussit à obtenir des épreuves sur papier, et Niépce de Saint-Victor, cousin du premier inventeur de l'« héliogravure », inaugure le *négatif sur verre* qui n'a pas cessé d'être employé.

Tout un volume serait nécessaire pour exposer en détail l'histoire des perfectionnements successifs de la technique photographique et de ses applications ; il suffira de rappeler ici quelques dates qui fixent les étapes des principales applications scientifiques auxquelles tous les pays ont collaboré, mais où le nôtre a presque toujours joué un rôle de premier plan.

Fizeau et Foucault inaugurent dès 1845 ces applications à l'astronomie, par de très belles photographies du soleil faites sur plaque daguérienne ; à mesure que les procédés deviennent plus perfectionnés, des astres de plus en plus faibles fournissent des épreuves de plus en plus détaillées, et bientôt l'investigation du ciel par la photographie dépasse de beaucoup en précision, rapidité et sûreté l'observation visuelle. A partir de 1885, les frères Henry, à l'Observatoire de Paris, emploient systématiquement la plaque sensible pour enregistrer la position précise des étoiles, et, en 1887, l'amiral Mouchez, directeur de notre Observatoire, prend l'initiative d'une immense carte de tout le ciel, formée de dix mille plaques photographiques, œuvre à laquelle collaborent les observatoires du monde entier, et qui est loin d'être terminée après trente années de travail.

La photographie prend possession de la topographie avec les travaux du colonel Laussedat qui montre comment la chambre noire peut être employée pour le lever exact et rapide d'une carte. Perfectionnée de jour en jour, la photogrammétrie devient toute une science, et se substitue presque complètement aux laborieux procédés de mesure des anciens topographes. L'invention de l'avion ouvre, de nos jours, un nouvel avenir à cette science, dont la dernière guerre a montré l'importance. Aujourd'hui, on ne peut concevoir de travail topographique, aussi bien l'étude détaillée des vieux pays que la rapide exploration des pays neufs, sans le secours de la plaque photographique.

Les mouvements trop rapides ne peuvent être suivis par l'œil ; les intervalles de temps trop petits échappent à nos sens comme les objets trop ténus ; entre les mains du physiologiste Marey, la plaque photographique allait être pour le temps ce que le microscope est pour l'espace ; dans une longue série de recherches commencée vers 1871, il étudie, décompose, dissèque les mouvements de l'homme et des animaux, y compris le vol des oiseaux, et y trouve des attitudes que personne n'avait soupçonnées. Les frères Lumière, en 1895, reconstituent ces mouvements sur l'écran de projection ; ils inventent le cinématographe, qui mérite mieux que l'usage qui en est fait, et dont les applications scientifiques sont loin d'être terminées. Elle constitue, en effet, un moyen d'investigation incomparable ; il suffira de citer à titre d'exemple les dix mille images par seconde d'un projectile en mouvement qui ont pu être récemment obtenues.

Enfin, l'étude des radiations a retiré de l'invention de la plaque photographique un profit inestimable ; l'exploration de tout le domaine des radiations invisibles de faible longueur d'onde jusqu'aux rayons X aurait été presque impossible sans cet auxiliaire. L'un des premiers, Edmond Becquerel, en 1842, utilise la plaque photographique à l'étude de l'ultra-violet ; Mascart continue en 1863, et Cornu pousse les recherches encore plus loin (1880). Aujourd'hui, la plaque photographique est presque seule employée pour l'étude des radiations, même des radiations visibles.

P^{HOTOGRAPHIE}
DES COULEURS Du point de vue artistique, il restait à résoudre le problème de la reproduction des couleurs. C'est presque entièrement en France que ce difficile problème a été résolu.

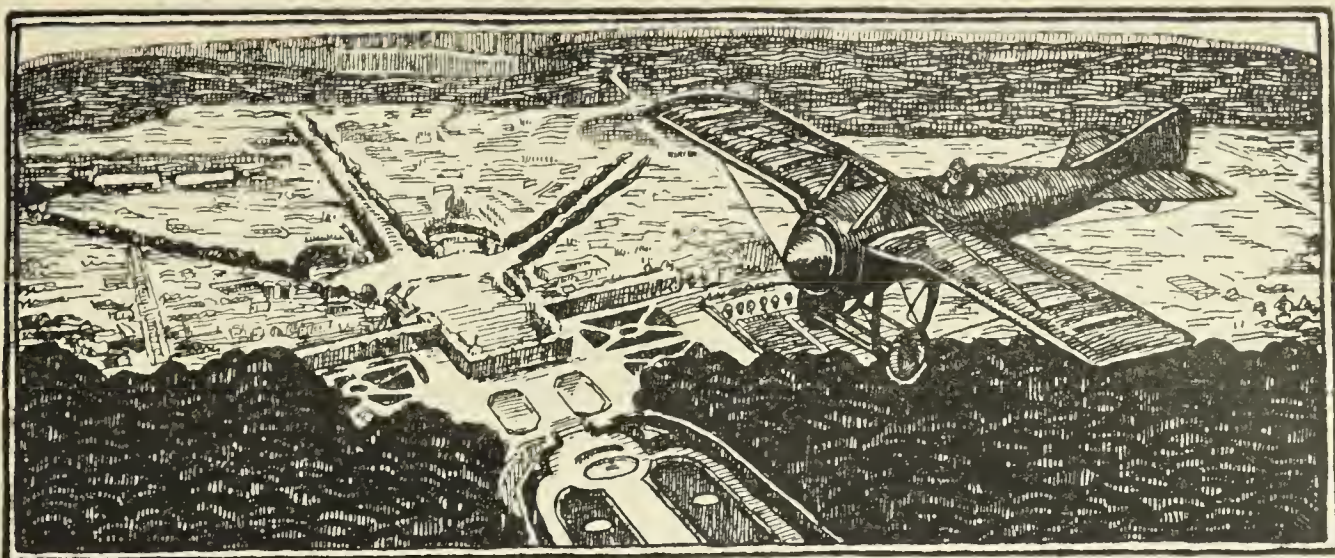
Dès 1847, Edmond Becquerel réussissait, par un procédé dont l'explication n'est pas encore parfaitement connue, à obtenir une reproduction des couleurs du spectre ; l'image ne pouvait être fixée, et la solution pratique du problème n'était pas encore obtenue.

Un peu plus tard, commençait la longue série des recherches systématiques qui devaient conduire à ce que l'on a appelé le *procédé trichrome* ; indépendamment l'un de l'autre, en 1867 et 1868, Charles Cros et Ducos du Hauron arrivaient à produire de belles épreuves en couleurs en partant de trois négatifs ordinaires obtenus à travers trois verres colorés convenablement choisis. D'une exécution un peu délicate, ce procédé rencontra d'abord de grandes difficultés ; Ducos du Hauron fit de longs efforts pour le faire adopter dans l'industrie de l'impression en couleurs, avec les faibles moyens dont on disposait alors. Enfin, en 1896, sa méthode devint d'un emploi universel, grâce uniquement aux progrès des procédés d'impression et

à la découverte de nouvelles plaques photographiques ; elle rend aujourd'hui les plus grands services dans toutes les publications où se trouvent des images en couleurs. En 1904, Louis Lumière réussit à obtenir la couleur au moyen d'une plaque unique, donnant, par une sorte de pointillé microscopique, toutes les couleurs des objets ; la *plaque autochrome* donnait la première solution vraiment pratique de la photographie en couleurs, et devenait immédiatement populaire.

Le problème, cependant, avait déjà reçu du physicien Lippmann, dès 1891, une solution très remarquable. Ce n'est pas au moyen de matières colorantes que Lippmann obtient la couleur sur ses épreuves photographiques, c'est au moyen d'une superposition de lames minces, comparables à la pellicule d'une bulle de savon, engendrées par la lumière elle-même. Malheureusement, le *procédé interférentiel* est d'une application difficile ; Lippmann en a obtenu des épreuves vraiment merveilleuses, qui ont fait l'admiration et l'envie de bien des coloristes, mais son exemple n'a presque pas été suivi.





CHAPITRE VI

LA PHYSIQUE CONTEMPORAINE

I. L'atomistique. L'énergétique opposée à toute hypothèse. L'atomisme se précise et s'impose. Extension du domaine des radiations. L'éther. L'expérimentation moderne. — II. Les rayons X et la radioactivité. L'électricité dans le vide. Les rayons cathodiques. Découverte des rayons X. Découverte de la radioactivité. Le rayonnement des corps radioactifs. Le radium. Curie. Les rayons X analysés par les cristaux. — III. Les ions dans les gaz et la physique moléculaire. Conductibilité électrique des gaz; expériences anciennes. Les molécules ionisées. Le mouvement brownien et l'agitation moléculaire. — IV. Les propriétés magnétiques des corps. Généralité des propriétés magnétiques. Lois de Curie. Le magnéton. Magnéto-optique. — V. Les applications. L'aviation. Les ondes électromagnétiques et la télégraphie sans fil. — VI. Conclusion.

I

L'ATOMISTIQUE



LA période dont on vient de retracer l'histoire avait abouti au développement complet de l'« énergétique ». On s'était surtout occupé de bien relier entre eux, par des lois précises, les phénomènes antérieurement découverts, et la doctrine de l'énergie, d'abord admise avec difficulté, avait fini par former le lien entre les divers phénomènes épars. On se préoccupait peu du mécanisme intime des phénomènes ; suivant le

précepte positiviste, on s'intéressait plus au « comment » qu'au « pourquoi ». On parlait toujours de l'éther, mais sous une forme assez vague pour ne pas soulever de difficultés ; on savait bien que les tentatives pour construire ce milieu à l'image des milieux élastiques matériels avaient, en somme, complètement échoué, mais on s'en préoccupait fort peu. L'atomisme prenait possession de la chimie, mais les physiciens, pour la plupart, regardaient avec indifférence cette théorie, d'apparence trop artificielle, qui ne leur avait apporté à peu près aucun fait nouveau. Chez beaucoup, cette attitude, en présence des tentatives d'explication concrète des propriétés de la matière, était un peu inconsciente ; chez d'autres, elle était parfaitement consciente et systématique. Un des esprits les plus philosophiques et en même temps les plus systématiques de la science moderne, Pierre Duhem, le champion de l'énergétique, a exposé d'une manière saisissante, dans un grand nombre d'écrits, les raisons de son attitude en face des idées atomistiques ; jusqu'à la fin de sa vie, sa manière de voir est restée la même, et les lignes suivantes ont été écrites à une époque où il fallait quelque courage, ou un certain manque de perspicacité, pour proclamer encore la faillite de l'atomisme :

« On peut traiter la physique théorique à la façon des cartésiens et des atomistes. Les corps que les sens et les instruments perçoivent, on les résout en corps immensément nombreux et beaucoup plus petits dont la raison seule a connaissance ; les mouvements que l'on observe, on les regarde comme les effets résultant des mouvements imperceptibles de ces petits corps ; à ces corps, on assigne des formes peu nombreuses et bien définies ; de leurs mouvements, on formule des lois très simples et entièrement générales. Ces corps, ces mouvements, sont à vrai dire les seuls corps réels, les seuls mouvements réels. Lorsqu'en les réunissant d'une manière convenable, on les a reconnus capables de produire des effets d'ensemble pareils aux phénomènes que nous observons, on déclare que l'on a découvert l'explication de ces phénomènes.

« Ce n'est pas ainsi que procède notre énergétique. Les principes qu'elle formule et dont elle développe les conséquences ne prétendent aucunement résoudre les corps que nous percevons, les mouvements que nous constatons, en corps imperceptibles et en mouvements cachés. Ils ne se posent aucunement en révélations sur la nature véritable de la matière. Ils ne prétendent rien expliquer. Simplement, ils se donnent pour règles générales dont les lois constatées par l'expérimentateur sont des cas particuliers.

« On peut concevoir la physique théorique à la façon des newtoniens. On rejette toute hypothèse sur les corps imperceptibles et sur les mouvements cachés dont

pourraient être composés les corps et les mouvements saisissables aux sens et aux instruments. Les seuls principes que l'on admette, ce sont des lois très générales connues par induction à partir de l'observation des faits.

« Notre énergétique ne suit pas la méthode newtonienne..

« Quand elle se refuse également à suivre la méthode des cartésiens et des atomistes et la méthode des newtoniens, l'énergétique agit-elle avec sagesse ? Un examen attentif des moyens de connaître dont la physique dispose justifie-t-elle la conduite qu'elle adopte ? A cette question nous avons répondu : Oui. »

L'ATOMISME SE PRÉCISE ET S'IMPOSE La critique à laquelle Duhem soumet l'atomisme s'applique fort bien à l'état de la science il y a un demi-siècle ; on ne pouvait alors faire autre chose qu'*imaginer* les propriétés de ces « corps immensément nombreux », sans autre guide que les propriétés des corps que les sens perçoivent, où les propriétés individuelles sont toutes mélangées ensemble. A cette époque, des constructions atomistiques, comme la théorie cinétique des gaz, pouvaient paraître comme un roman ingénieux, peut-être sans le moindre lien avec la réalité, et la méfiance des hommes épris avant tout de rigueur mathématique s'expliquait parfaitement. Mais c'est la caractéristique de la période contemporaine d'avoir découvert des faits nouveaux, d'avoir pu utiliser des moyens d'action qui donnent presque à l'idée atomistique la certitude d'une réalité objective. Rien n'était à abandonner des conquêtes de l'énergétique, mais cette science avait épuisé ses facultés créatrices ; il fallait autre chose pour coordonner les faits nouveaux et pour suggérer de nouvelles découvertes.

Chose curieuse, c'est la découverte d'un rayonnement, que nous savons aujourd'hui être du domaine de l'optique, qui, par suite, appartient à ce que l'on appelait naguère la « physique de l'éther » qui a ouvert la voie aux idées nouvelles sur la physique de la matière et qui a provoqué le mouvement que l'on peut appeler le « néo-atomisme ». C'est, en effet, à la découverte des rayons X en 1895, aboutissement un peu fortuit d'une longue série de recherches sur l'électricité dans les gaz, que l'on doit faire remonter cet important mouvement d'idées. C'est que ces nouveaux rayons donnaient un moyen extraordinairement puissant pour agir sur la matière, et que leur découverte, par un curieux enchaînement de circonstances, fut presque immédiatement suivie de celle de la radioactivité. Ces phénomènes nouveaux, en dehors de leur immense intérêt propre, avaient ceci de particulier qu'ils mettaient, entre les mains des physiciens, de la matière dans un état non encore connu, et dans lequel les propriétés atomiques se révèlent d'une manière presque évidente.

La molécule ordinaire est si petite qu'elle ne se manifeste jamais à nous à l'état isolé ; comme l'exprimait si fortement Duhem, on ne pouvait qu'*imaginer* ces petits corps ; on était obligé de se borner à dire que ces corps étaient « très petits » et que leur nombre était « immense ». Dans la période contemporaine, tout va changer. Quelques-unes de ces particules sont dans un état assez actif pour qu'elles puissent se manifester à nous d'une manière presque individuelle ; on sort du vague d'autrefois, les dimensions se précisent, les nombres « immenses » cessent d'être indéterminés, les propriétés des dernières particules ne sont plus seulement « imaginées », elles sont, en grande partie, directement observées. Dès lors, d'anciennes théories que l'on regardait avec méfiance vont recevoir comme un sang nouveau ; la théorie cinétique des gaz, par exemple, n'apparaîtra plus comme un ingénieux roman, mais comme l'expression même de la vérité. L'imagination fait place à la réalité, et il s'est trouvé que, bien des fois pendant cette période, les faits ont suggéré des idées auxquelles l'imagination seule n'aurait jamais osé penser. L'un de ceux qui ont le plus fait pour le progrès des idées atomistiques pendant ces dernières décades, le physicien anglais J. J. Thomson, a exprimé d'une manière saisissante ce rôle respectif de l'imagination et des faits, ces derniers servant de stimulant, contrairement à la croyance ordinaire, et l'imagination ayant, parfois, de la peine à suivre les faits.

« C'est une opinion largement répandue que l'esprit est, par lui-même, spéculatif au delà de toute limite, et qu'il n'est préservé des conceptions extravagantes que par le contrôle de son stupide et prosaïque partenaire, le fait matériel. La vérité, à mon sens, est plutôt que l'esprit agit, dans cette association, comme un frein, que le partenaire impulsif est le fait physique, et que celui-ci excite l'esprit à faire des bonds dont il frémirait s'il n'était sous l'influence d'un tel aiguillon. La nature est beaucoup plus merveilleuse et étrange que tout ce que nous pouvons tirer du plus profond de notre connaissance. »

Lamarck avait écrit plus d'un siècle avant : « L'imagination de l'homme ne saurait créer une seule idée qui ne prenne sa source dans celles qu'il s'est procurées par ses sens. »

EXTENSION DU DOMAINE DES RADIATIONS

Pendant que se précisait ainsi la constitution de la matière, le domaine des radiations s'étendait de plus en plus. La théorie électromagnétique de la lumière, admirable construction mathématique de Maxwell, était déjà étayée sur d'importantes confirmations numériques ; il manquait une confirmation plus tangible, la production d'un rayonnement de même espèce que la lumière par un processus évidemment électrique. Cette lacune

fut comblée en 1888 par les belles expériences de Hertz sur les ondes électromagnétiques. D'autre part, les radiations invisibles s'étendaient de plus en plus par les deux frontières, et finissaient tout récemment par rejoindre les rayons X, un peu après que l'on eut reconnu la nature de ceux-ci. Il n'y a plus aujourd'hui le moindre doute : radiations lumineuses, rayons ultra-violet et infra-rouge, rayons X, ondes électromagnétiques sont de même espèce ; toutes consistent en une perturbation électromagnétique périodique, toutes se propagent avec la même vitesse qui est bien celle que l'on peut calculer en partant des mesures purement électriques, et elles ne diffèrent entre elles que par la fréquence plus ou moins grande du phénomène périodique. Tout ce qu'il y avait de vraiment essentiel dans la théorie de Fresnel est conservé, et l'on y joint le lien non soupçonné avec les phénomènes électromagnétiques.

L'ÉTHER Et dans tout cela, qu'est devenu l'éther qui, au moins dans les mots, jouait un si grand rôle dans les théories du milieu du dix-neuvième siècle ? Il faut bien le dire, l'éther s'est à peu près évanoui. On le considérait comme un milieu élastique, et l'on avait essayé de l'imaginer à la manière des milieux élastiques ; toutes les tentatives de ce genre avaient complètement échoué. On trouve, dans certains mémoires écrits vers 1860, des considérations sur les mouvements des « molécules d'éther » ; parfois même, on a prétendu trouver la loi d'action réciproque de ces molécules entre elles ou avec celles de la matière ; étrange mélange d'atomisme, d'idées newtoniennes et de l'idée de milieu. Rien de tout cela n'a jamais pu être rattaché à aucune réalité. Prenant la question d'une manière plus directe, bien des tentatives ont été faites pour mettre en évidence le mouvement de la matière par rapport à l'éther ; elles ont toujours échoué, si bien que l'on est arrivé invinciblement à cette conclusion : il n'y a pas d'autre mouvement que celui de la matière par rapport à la matière, et par suite l'éther, en tant que milieu élastique doué de propriétés mécaniques, n'a aucune existence.

L'EXPÉRIMENTATION MODERNE Dans tout cela, comme on le voit, ce n'est pas l'imagination qui joue le rôle de moteur ; les idées les plus hardies ont eu leur point de départ dans les faits observés. Mais il faut remarquer ici, et c'est encore une des particularités de la physique contemporaine, que ces faits, le plus souvent, ne sont pas ceux que nous offre directement la nature. Dans les phénomènes naturels, les effets les plus divers sont constamment mêlés ensemble ; c'est évidemment en les observant que l'idée est venue d'en chercher les lois, mais il faut ensuite les simplifier pour isoler les éléments simples. De là, la nécessité d'une

technique de plus en plus compliquée à mesure que l'on veut étudier des phénomènes plus cachés. La radioactivité, par exemple, existe dans les phénomènes naturels ; elle joue même probablement un rôle considérable dans l'évolution des astres ; mais autour de nous elle est, en quelque sorte, trop diluée au milieu d'autres phénomènes pour apparaître à la simple observation. De grandes découvertes ont été faites, autrefois, avec des moyens rudimentaires ; cela est devenu de plus en plus rare. La recherche, en physique, exige de plus en plus un outillage parfaitement adapté au but poursuivi. A ce point de vue, la période précédente avait montré, en France, la plus extrême pauvreté ; c'est à peine si la nécessité d'un outillage pour la recherche était comprise ; les laboratoires des facultés, pauvres en hommes, étaient encore plus pauvres en moyens de travail, et c'est en grande partie l'explication de l'éclipse momentanée, malgré de brillantes exceptions, de la physique française après la disparition de la génération d'Ampère et de Fresnel. La période contemporaine offre, à cet égard, le spectacle d'un grand effort. En 1895, les universités françaises sont fondées, avec une organisation relativement libérale et des moyens de travail encore insuffisants, mais cependant non négligeables. Cet effort a déjà, comme on va le voir, porté ses fruits.

Le nombre des travailleurs, dans ces trente dernières années, est devenu beaucoup plus grand qu'il n'avait jamais été ; les publications sont devenues de plus en plus abondantes, et les recherches de plus en plus variées. Il ne peut être question ici de donner même un aperçu de tout ce qui a été trouvé ; on ne s'étonnera pas si des travaux, même d'un grand intérêt, ne figurent pas dans les pages qui vont suivre ; plutôt que de donner une sèche et inutile énumération, on a essayé de retracer rapidement l'histoire des recherches qui, dans notre pays, ont réellement ouvert des voies nouvelles.

II

LES RAYONS X ET LA RADIOACTIVITÉ

L'ÉLECTRICITÉ Ces deux mémorables découvertes, que des circonstances
DANS LE VIDE en partie fortuites ont placées à quelques mois l'une de
l'autre, ont été la conséquence d'une très longue série de recherches, dont il faut
faire remonter l'origine à près de deux siècles, sur les phénomènes qui accompa-
gnent le passage de l'électricité à travers les gaz. L'étincelle qui se produit entre

un corps électrisé et un corps relié au sol a été la première manifestation connue du passage de l'électricité à travers l'air. Bientôt, l'idée vint d'essayer de produire le même phénomène « dans le vide », c'est-à-dire en réalité à travers de l'air raréfié ; la variété des effets lumineux obtenus frappa vivement les premiers observateurs, qui répétèrent, les uns après les autres, l'expérience sous mille formes diverses, souvent sans autre préoccupation que d'obtenir des effets agréables à l'œil. Chaque perfectionnement dans les moyens de raréfier les gaz, chaque progrès dans les appareils producteurs d'électricité, donnaient lieu à de nouvelles expériences et à de nouvelles descriptions ; il n'est presque pas un physicien du dix-huitième ou du dix-neuvième siècle qui n'ait apporté quelque aspect plus ou moins nouveau de la décharge électrique dans les gaz raréfiés. Faraday n'avait pas dédaigné de s'en occuper, et une certaine portion non lumineuse du tube illuminé par la décharge électrique porte encore le nom d'« espace obscur de Faraday ». Le physicien genevois de la Rive avait décrit, vers 1860, de nouvelles variétés de phénomènes. Vers la même époque, l'invention de la bobine d'induction à la suite des perfectionnements apportés par Masson, par Fizeau, par Foucault, donnait un moyen plus puissant et plus commode que l'antique machine électrostatique pour répéter les expériences de ce genre ; en même temps, l'invention de nouvelles machines pneumatiques sans piston, utilisant le vide de la chambre barométrique ou l'écoulement du mercure donnaient le moyen de pousser « le vide » beaucoup plus loin et offraient de nouveaux aspects à la curiosité des physiciens. Entre temps, la découverte de l'analyse spectrale avait donné un aliment nouveau à ces recherches purement descriptives, en montrant que la composition spectrale de la lumière émise est caractéristique de la nature du gaz à travers lequel passe la décharge ; c'est l'examen de la décharge à travers l'hydrogène qui avait permis à Rayet, en 1868, de découvrir la véritable nature des protubérance solaires.

Cependant la variété même des effets obtenus empêchait toute coordination des résultats. La question allait entrer dans une voie nouvelle par les recherches du physicien anglais Crookes. Très habile expérimentateur, Crookes s'était spécialisé dans l'étude des gaz les plus raréfiés, et se mit à étudier le passage de la décharge électrique dans ces conditions ; il trouva (1878) des aspects tout à fait curieux. Le gaz (dont la densité est réduite presque à rien) n'est plus lumineux, tandis que les parois du vase qui le contient s'illuminent d'une vive lumière verte ; Crookes, par une série d'expériences ingénieuses, arrive à montrer que cette illumination est due à une sorte de rayonnement particulier émis par l'électrode négative ou cathode, rayonnement qui se propage en ligne droite à travers le tube, rend lumineux et chauffe vivement

les corps solides qu'il rencontre, exerce sur eux une pression, comme le ferait un bombardement par des corpuscules lancés à une grande vitesse. Crookes, esprit aventureux autant que hardi expérimentateur, pensa immédiatement que ce rayonnement n'était autre chose qu'un flux de molécules matérielles lancées avec une grande vitesse, et il donna le nom de « quatrième état de la matière », ou « état radiant », au gaz très raréfié sur lequel il expérimentait. Il y avait une grande part de vérité dans l'explication de Crookes ; ce qu'il avait observé était bien un « bombardement », mais non pas par des molécules matérielles ; ses rayons étaient de pures charges électriques lancées avec une grande vitesse ; Crookes avait retrouvé et observé plus purement les « rayons cathodiques » que l'on connaissait déjà.

Les expériences de Crookes soulevèrent un grand mouvement de curiosité. L'expérience était facile à répéter pour qui possédait l'ampoule dans laquelle la raréfaction du gaz avait été poussée assez loin ; des constructeurs de tous les pays se mirent à réaliser les appareils imaginés par Crookes, et peu d'années après, il n'y eut pas un laboratoire au monde qui ne possédât quelque « tube de Crookes », et presque pas de cours de physique ou de chimie où l'on ne montrât le « quatrième état de la matière ».

LES RAYONS CATHODIQUES

Cependant, l'idée de Crookes sur la nature de ces rayons était fortement contestée. Hertz montra bientôt qu'ils traversaient de très minces feuilles de métal placées à l'intérieur de l'ampoule ; un peu plus tard, Lenard parvenait à les faire sortir de l'ampoule et à les faire passer dans l'atmosphère en munissant l'ampoule d'une « fenêtre » constituée par une de ces très minces feuilles. Pendant quelque temps, il apparut presque inadmissible qu'un bombardement moléculaire pût ainsi traverser sans la percer une feuille métallique. Lenard et l'école allemande soutenaient, à la suite de ces expériences, que la « théorie de l'émission » pour expliquer les rayons cathodiques était insoutenable, et qu'il fallait les attribuer à une cause non matérielle, plus ou moins analogue à celle qui explique la lumière.

La question fut tranchée par une expérience décisive, faite en 1895 par Jean Perrin, alors préparateur au laboratoire de l'École normale. Perrin montra, par une expérience directe, que les rayons cathodiques transportent avec eux une charge électrique négative. Comme, d'autre part, l'ensemble de leurs autres propriétés (déviation par un champ magnétique, action d'un corps électrisé, effets mécaniques et calorifiques) s'expliquait bien par l'idée de l'« émission », on fut amené à admettre que les rayons cathodiques sont simplement constitués par de l'électricité négative, sans aucun support matériel, lancée avec une grande vitesse à travers l'ampoule vide.

L'hypothèse de Crookes renfermait bien une part de vérité, mais là où il disait « molécules », il fallait dire « électricité négative » ; quant au « quatrième état de la matière », c'était une pure illusion.

DÉCOUVERTE DES RAYONS X La même année (1895) le tube de Crookes allait offrir une autre surprise aux physiciens. Röntgen, qui expérimentait sur les rayons cathodiques, observa par hasard que, du tube de Crookes en fonctionnement, émane un rayonnement étrange, non visible, mais rendant lumineux les corps fluorescents et agissant sur la plaque photographique. Ces rayons se propagent exactement en ligne droite, traversent les corps opaques et permettent de photographier le squelette de l'homme et des animaux. L'annonce de cette découverte fut accueillie par un cri d'étonnement ; la surprise était d'autant plus grande que tous les laboratoires possédaient les appareils nécessaires pour que l'on pût répéter l'expérience : un tube de Crookes, une bobine d'induction, une plaque photographique enveloppée de papier noir ou un écran enduit d'une substance fluorescente, il n'en fallait pas plus pour photographier les os d'une main, ou même pour voir jouer les articulations du squelette d'un patient, qui ne se doutait pas encore du danger des nouveaux rayons. En quelques semaines, les expériences de Röntgen furent répétées dans le monde entier. La nature des nouveaux rayons restait absolument mystérieuse ; on ne savait même pas par quelle partie de l'appareil ils étaient émis.

Très peu de temps après la découverte de Röntgen, quelques photographies de squelettes (car c'est cette application qui avait le plus excité la curiosité) étaient présentées à l'Académie des sciences et donnaient l'occasion d'échanger des idées sur les nouveaux rayons. Le grand mathématicien Henri Poincaré exprima l'idée, à titre d'hypothèse, que peut-être l'émission des rayons X était-elle liée à la fluorescence du verre frappé par les rayons cathodiques. Il y avait à la fois, dans cette hypothèse, une part de vérité et une erreur ; nous savons aujourd'hui que, dans l'ampoule de Crookes, c'est bien la paroi de verre qui émet les rayons X, mais nous savons aussi que cette émission est sans aucun lien avec la fluorescence, puisque l'émission a lieu aussi bien, et même mieux, par des corps qui ne présentent aucune fluorescence. Il se trouva que la partie inexacte de l'hypothèse faite par Poincaré allait amener une très grande découverte.

DÉCOUVERTE DE LA RADIOACTIVITÉ Si l'émission de rayons X était liée à la fluorescence, on pouvait espérer la retrouver sur des corps rendus fluorescents par l'action de la lumière, sans aucune intervention de la décharge électrique.

L'expérience fut immédiatement essayée par Henri Becquerel, qui avait sous la main tous les éléments nécessaires. Au laboratoire de physique du Muséum, où il avait succédé à son père, il avait à sa disposition les substances phosphorescentes et fluorescentes dont Edmond Becquerel s'était servi dans ses belles recherches qui remontaient déjà à trente ans. L'expérience fut essayée sur un échantillon d'un sel d'uranium, qui était rendu phosphorescent par l'action de la lumière pendant que l'on essayait son action sur une plaque photographique entourée de papier noir. La plaque montra que le sel d'uranium avait agi, et l'hypothèse de Poincaré sembla confirmée. Becquerel voulut alors voir pendant combien de temps l'action se continuait après que l'excitation par la lumière avait cessé ; le résultat fut complètement inattendu ; l'action se continuait indéfiniment ; elle n'avait aucun lien avec la fluorescence.

Après quelques tâtonnements, Becquerel vit bien qu'il s'agissait d'une propriété spécifique de l'uranium et de ses composés ; il vit que cette propriété était indépendante de l'état de combinaison dans lequel le corps simple uranium pouvait se trouver ; en un mot, il découvrit que c'était une propriété atomique, se continuant indéfiniment, sans aucune intervention des circonstances extérieures. La radioactivité était découverte. Toute une contrée inconnue s'offrait à l'exploration des physiciens. Un grand nombre d'entre eux se mirent au travail ; les faits découverts furent si nombreux, ils furent l'œuvre d'un si grand nombre de travailleurs que l'on ne peut songer ici à en écrire l'histoire détaillée ; on devra se borner aux grandes lignes.

Il y avait à travailler dans deux directions distinctes. D'une part, il fallait faire l'étude des nouveaux rayonnements, celui du tube de Crookes et celui de l'uranium ; on ne savait à peu près rien sur l'un ni sur l'autre, si ce n'est qu'ils avaient en commun la propriété de se propager en ligne droite et de traverser plus ou moins certains corps opaques. D'autre part, il y avait à étudier les corps susceptibles d'émettre les « rayons de Becquerel » connus alors seulement par les propriétés de l'uranium. Cette propriété était-elle unique dans toute la chimie ? Trouverait-on d'autres corps doués des mêmes propriétés, peut-être à un plus haut degré ? Il n'a fallu qu'un très petit nombre d'années pour que la plupart de ces questions se trouvent résolues, parfois d'une manière absolument inattendue. Ce fut l'œuvre de deux groupes de savants, que l'on peut désigner brièvement sous le nom d'école anglaise et d'école française, la première avec J. J. Thomson et Rutherford, la seconde avec Becquerel, Pierre Curie et Mme Curie.

**L E RAYONNEMENT DES
CORPS RADIOACTIFS**

L'étude des rayons de l'uranium fut immédiatement commencée par Becquerel, qui en découvrit la nature complexe en faisant agir sur eux le champ magnétique d'un électro-aimant. Il montra qu'une partie du faisceau est déviée dans un sens, et que cette partie transporte une charge électrique négative ; cette partie du rayonnement est composée de ces « rayons cathodiques » que Crookes étudiait dans l'ampoule à gaz raréfié, et que l'uranium produit spontanément d'une manière indéfinie. Le reste du faisceau se compose lui-même de deux parties : l'une est identique aux rayons X et l'autre, qui fut plus particulièrement étudiée par Rutherford, est composée de particules chargées d'électricité positive. L'école anglaise devait, un peu plus tard, étudier à fond ce dernier rayonnement, montrer qu'il était constitué par des particules d'hélium électrisé, et se servir de ce rayonnement pour d'étonnantes découvertes sur les propriétés de l'atome.

**L E RADIUM.
CURIE**

Les propriétés de l'uranium restaient une énigme unique dans la nature. Ce fut surtout l'œuvre des Curie de montrer que d'autres corps présentent les mêmes propriétés à un degré beaucoup plus élevé et de découvrir toute la technique des corps radioactifs.

Pierre Curie était l'un des deux fils d'un médecin de Paris ; il naquit en 1859. Son frère et lui étaient vivement attirés par la physique expérimentale, et commencèrent de très bonne heure leurs travaux de laboratoire. En 1879, Pierre était préparateur de Desains à la Sorbonne, et travaillait dans les misérables laboratoires de cette époque, faits de pièces et de morceaux, dans de vieilles maisons de la rue Saint-Jacques, mal reliées entre elles et à peine nettoyées avant de servir de laboratoire. Desains avait été l'un des premiers à comprendre la nécessité d'un laboratoire et non d'une simple collection d'appareils, pour que la recherche en physique pût produire quelques résultats. La liste de ses travaux ne présente rien de très important, mais il lui reste ce mérite d'avoir fourni à d'autres les moyens et le goût de la recherche expérimentale. Curie publia avec lui un travail important sur la mesure des longueurs d'onde dans l'infra-rouge ; c'était le prolongement, par une méthode nouvelle, des mesures faites par Mouton dans le même laboratoire ; l'étude expérimentale des radiations de grande longueur d'onde sortait enfin de la phase purement descriptive. A la même époque, Curie travaille avec son frère au laboratoire de Friedel où l'on s'occupait surtout de minéralogie, et c'est là que les deux frères découvrent le phénomène de la piézo-électricité et en font une étude magistrale. L'École de physique et de chimie ayant été créée par la Ville de Paris en 1882,

Curie y accepta les modestes fonctions de chef des travaux pratiques de physique et c'est là, dans un laboratoire très pauvre, qu'il fit la plupart des travaux qui devaient illustrer son nom. A l'époque où nous sommes parvenus, Curie était absolument inconnu du grand public, mais tous ceux qui étaient au courant des progrès de la physique le regardaient déjà comme un maître. Il venait d'achever un admirable travail sur les propriétés magnétiques des corps, et ses idées très originales sur la symétrie dans les phénomènes physiques avaient vivement intéressé tous les physiciens. Il était engagé dans de nouvelles recherches sur les cristaux lorsque



PIERRE CURIE

Mme Curie songea à rechercher les propriétés de l'uranium dans les divers composés de ce corps et dans les divers minéraux qui en contiennent. Des mesures précises montrèrent que, dans les divers composés, la radioactivité était exactement proportionnelle à la quantité d'uranium contenue dans la combinaison ; la propriété radioactive était bien une propriété atomique, indépendante de l'état de combinaison. Exceptionnellement, certains minéraux montrèrent une activité plus grande que celle de l'uranium pur. L'explication fut immédiatement aperçue : ces minerais devaient contenir un corps inconnu, plus actif que l'uranium. Curie vit tout de suite l'importance de cette découverte, et abandonna ses travaux en

cours pour collaborer à ces nouvelles recherches. Mme Curie arriva bientôt à démontrer l'existence d'un corps nouveau, qu'elle nomma le polonium. Peu de temps après, Pierre Curie et Mme Curie, unissant leurs efforts pour une recherche qui exigeait toutes les ressources de la physique et de la chimie, découvraient le radium, et arrivaient à le caractériser comme un métal analogue au baryum. Le métal lui-même fut finalement obtenu à l'état de liberté en 1910 par Mme Curie.

Le nouveau corps était des millions de fois plus actif que l'uranium ; des effets qui étaient à peine sensibles devenaient considérables, et les découvertes allaient se succéder rapidement. Celle qui produisit le plus profond étonnement fut le dégagement de chaleur que le radium produit spontanément, indéfiniment, sans l'intervention d'aucune énergie étrangère. On se demanda un moment s'il faudrait

abandonner le principe de la conservation de l'énergie. Pour échapper à cette nécessité, deux hypothèses se présentèrent immédiatement, aussi étranges l'une que l'autre. La première consistait à admettre que la terre reçoit, on ne sait d'où, un rayonnement invisible que le radium absorbe et qui lui fournit l'énergie qu'il transforme en chaleur. La seconde suppose que le radium, ce « corps simple », se décompose peu à peu, disparaît lentement, et que le dégagement de chaleur est l'équivalent d'une diminution d'énergie correspondant à cette transformation. Curie avait examiné soigneusement ces deux hypothèses ; un moment, il avait paru se rallier à la première, mais bientôt tout un ensemble de faits imposait la seconde. On parvint à saisir sur le fait la décomposition progressive du radium, sa transformation en d'autres produits radioactifs et en gaz hélium, avec comme résidu final du plomb. On assistait à une véritable transmutation d'éléments, et cette constatation a révolutionné toutes les idées sur la nature et la constitution des atomes.

Ce n'est qu'en 1900 que Curie fut chargé d'un enseignement à la Sorbonne et seulement en 1904 que fut créée une chaire dans laquelle il enseigna la science qu'il avait tant contribué à créer. Il mourut en 1906, victime d'un accident sur la voie publique.

**LES RAYONS X ANALYSÉS
PAR LES CRISTAUX** Les rayons X restaient toujours une énigme. On était sans action sur eux ; ils ne pouvaient subir ni réflexion ni réfraction, ils traversaient tous les corps, et la seule propriété que l'on pût traduire en nombre était justement cette absorption plus ou moins grande par la matière. Ces propriétés absorbantes avaient été très complètement étudiées dès 1900 par Benoist. Cet unique moyen d'action avait cependant permis de constater que les rayons X ne formaient pas un faisceau homogène ; comme la lumière, ils étaient formés par le mélange d'une infinité d'éléments simples, mais ces éléments on ne savait pas les isoler et l'on en ignorait la nature. L'énigme n'a été résolue qu'en 1912 par Laue, qui eut l'idée d'agir sur les rayons au moyen du « réseau cristallin » imaginé par Bravais. Le succès de l'expérience conduisit à la fois à la confirmation éclatante des idées de Bravais sur la constitution des cristaux et à reconnaître que les rayons X appartiennent au même groupe que les radiations lumineuses. Ces rayons ne diffèrent de la lumière ordinaire que par l'extraordinaire rapidité de leurs vibrations ; ils sont, si l'on peut ainsi s'exprimer, de l'hyper-ultra-violet.

III

LES IONS DANS LES GAZ ET LA PHYSIQUE MOLÉCULAIRE

CONDUCTIBILITÉ ÉLECTRIQUE DES GAZ. EXPÉRIENCES ANCIENNES

Les rayons X avaient rendu un autre service à la physique : ils avaient rappelé l'attention sur les phénomènes de conductibilité électrique que présentent les gaz dans certaines circonstances. Chose vraiment curieuse, la plupart des faits dont il va être question étaient connus depuis fort longtemps ; ils dormaient, épars, sans que personne eût songé à établir un lien entre eux. Il fallut le coup de fouet donné par la découverte des rayons X et l'intérêt qui s'attachait à tout ce qui venait d'eux pour que l'attention fût éveillée.

Toute l'ancienne électrostatique est pleine de détails sur les moyens propres à obtenir l'isolement parfait des appareils ; le succès des expériences dépendait de l'application correcte de cette technique. Supports de verre bien sec, suspension par des fils de soie, manches en cire d'Espagne ou mieux encore en ambre, tout cela est minutieusement décrit dans les ouvrages du dix-huitième siècle. Lorsque toutes les précautions avaient été prises, l'isolement était presque parfait, et comme les appareils restaient tout de même en contact avec l'air, il fallait en conclure que l'air était un isolant presque parfait. On avait cependant constaté que, dans certaines circonstances un peu mystérieuses, le seul contact de l'air suffisait à décharger les corps électrisés, comme si l'air était devenu conducteur. Dès 1733, Dufay avait remarqué que l'air qui se trouve au voisinage d'un corps incandescent devient conducteur de l'électricité. La conductibilité des flammes était un phénomène connu de tout le monde au dix-huitième siècle. En 1853, Edmond Becquerel consacra un mémoire important à la conductibilité des gaz provoquée par le voisinage d'un corps à haute température ; il termine par une conclusion qui se rapproche singulièrement des idées actuelles : « Les résultats exposés dans ce travail mettent en évidence la propriété que possèdent les gaz de livrer passage aux courants électriques lorsqu'ils environnent des électrodes métalliques parfaitement isolées et que leur température est suffisamment élevée. » Il indique aussi que les faits observés pourraient conduire à admettre que « les électrodes métalliques chauffées laissent échapper des particules matérielles... qui établissent une circulation continue d'électricité. »

Ces « particules matérielles » s'étaient manifestées d'une autre manière. Lorsque l'on refroidit par détente de l'air humide, il y a condensation de la vapeur d'eau sous forme de brouillard ; mais si l'air est complètement dénué de corps étrangers la condensation ne se produit que très difficilement. Dès 1875, Coulier, professeur au Val-de-Grâce, avait étudié ce phénomène par des procédés très simples, et cherché les conditions où l'air devient « actif », c'est-à-dire propre à produire la condensation de la vapeur ; il avait montré que cette activité est communiquée par de véritables corps étrangers, qui peuvent être produits dans des circonstances fort diverses, en particulier par le contact d'une flamme ou d'un corps incandescent. Le rapprochement avec les phénomènes de conductibilité électrique n'eut lieu que plus tard, et fut d'une grande importance en donnant le moyen de *voir*, par la gouttelette d'eau qui se condense sur elle, la molécule électrisée.

LES MOLÉCULES
IONISÉES Tout cela était presque oublié, lorsque l'on annonça que les rayons X avaient la propriété, eux aussi, de décharger un corps électrisé. Cette importante découverte avait été faite presque en même temps en France, en Angleterre et en Italie. Le mécanisme en restait obscur ; le phénomène était-il dû à une action des rayons sur le métal du conducteur, ou sur le gaz qui l'entoure ? Une expérience directe de Jean Perrin montra que, pour la plus grande partie au moins, l'action était sur l'air, qui devenait conducteur sans qu'il fût nécessaire que les rayons agissent sur le métal électrisé. L'attention fut alors attirée sur tous les phénomènes de ce genre, que l'on attribua à la présence de molécules électrisées prenant naissance dans le gaz. Leur étude détaillée nous entraînerait trop loin ; il suffira de dire quel a été l'intérêt considérable de cette idée à la fois nouvelle et ancienne.

D'abord, les particules *ionisées* (c'est ainsi que l'on appelle, d'un nom introduit par Faraday, les particules électrisées qui se meuvent dans un champ électrique) ont des propriétés autrement actives que les molécules ordinaires. Celles-ci ne se révèlent à nous qu'en nombre immense ; isolées, elles passent inaperçues. De là, la possibilité d'étudier presque séparément ces *ions*, de les compter, de trouver la charge électrique de chacun d'eux et, indirectement, de déterminer le nombre des molécules ordinaires. En peu de temps, on acquit sur ces ions plus de données précises qu'on n'en avait obtenu en des siècles de recherches sur les molécules de la matière inerte.

D'autre part, ces ions électrisés provenaient directement des molécules ordinaires ; sur un gaz parfaitement pur, il suffit de faire agir un faisceau de rayons X pour que

des ions y prennent naissance, et ce fait contribua plus qu'aucun autre à habituer les physiciens à cette idée que l'électricité est un des constituants essentiels de toute matière.

**L E MOUVEMENT BROWNIEN ET
L'AGITATION MOLÉCULAIRE**

Tout cela avait attiré de nouveau l'attention sur l'hypothèse moléculaire, et en particulier sur la théorie cinétique des gaz, qui n'avait jamais eu beaucoup de crédit en France. D'après cette théorie, un gaz serait composé d'un nombre immense de molécules, toutes identiques entre elles et agitées d'un mouvement d'autant plus rapide que la température est plus élevée. Les chocs de ces particules contre les parois expliquent la pression. Déjà Bernoulli avait montré que cette hypothèse explique assez bien les propriétés des gaz, et plus tard, Maxwell, Clausius, Boltzmann avaient précisé la théorie. Mais comment croire à la réalité de ce grouillement de particules dans un gaz parfaitement immobile et inerte ? On avait eu cependant, depuis longtemps, sous les yeux une parfaite image de cet état d'agitation dans ce que l'on appelle encore le mouvement brownien. En 1827, le botaniste anglais Brown, particulièrement versé dans la technique du microscope, avait découvert que toutes les fois qu'un liquide tient en suspension de très fines particules d'un corps étranger, celles-ci sont animées d'un extraordinaire mouvement d'agitation qui ne cesse jamais. Tous ceux qui ont vu ce phénomène ont été frappés d'étonnement devant ce perpétuel grouillement de la matière inerte. Diverses explications avaient été proposées ; quelques-uns avaient timidement avancé que ce mouvement était peut-être identique au mouvement d'agitation prévu par la théorie cinétique des gaz. En 1888, Gouy, professeur à la Faculté des sciences de Lyon, soumit ce phénomène à une étude très serrée, et montra qu'il était indépendant de toutes les circonstances accidentelles, et que pour l'expliquer on ne peut invoquer ni les inégalités de température, ni les trépidations du sol, ni l'évaporation du liquide ; c'est bien une propriété naturelle et intrinsèque de tous les liquides, que la présence de petits corps étrangers ne fait que révéler. Gouy conclut à l'identité entre le mouvement brownien et celui des molécules dans un gaz.

Il restait à faire l'étude quantitative du phénomène. C'est ce que fit Perrin à partir de 1908. Il montra que le phénomène était quantitativement ce qu'il devait être, et il put déduire de ses observations une numération des molécules, qui n'empruntait rien aux expériences électriques, et qui concordait très exactement avec le résultat de celles-ci. La théorie cinétique des gaz, qui, il y a peu d'années, était souvent considérée comme un ingénieux roman, devient une réalité incontestable.

Tout cela confirmait l'exactitude de très vieilles idées sur la constitution moléculaire de la matière, mais en donnant à ces idées une précision qui leur avait toujours manqué. Là où l'on parlait de particules « très petites », en « nombre immense », la physique contemporaine donne des valeurs précises du poids et des dimensions de chaque atome, du nombre de ces éléments contenus dans chaque gramme de matière. « Si, parlant d'une quantité, vous ne pouvez pas l'exprimer en nombres, disait lord Kelvin, vos connaissances sont d'une pauvre espèce, et bien peu satisfaisantes. » La théorie atomique était, presque depuis l'antiquité, dans cet état peu satisfaisant ; la physique contemporaine l'en a fait définitivement sortir.

IV

LES PROPRIÉTÉS MAGNÉTIQUES DES CORPS

GÉNÉRALITÉ DES PROPRIÉTÉS MAGNÉTIQUES

Voici un sujet d'études bien ancien et où l'on pourrait croire que tout est trouvé depuis longtemps ; il nous a réservé des surprises et il s'en faut de beaucoup que tout soit connu.

L'aimant attire le fer ; ce fut le point de départ de toute l'histoire du magnétisme. Cette attraction est due à ce que le fer s'aimante ; cela était connu dès le dix-septième siècle. Mais le fer présente, parmi tous les corps, une exception étrange. Un peu plus tard, lorsque de nouveaux métaux furent découverts, on s'aperçut que le nickel et le cobalt avaient la même propriété, et c'était tout. Avec les faibles moyens dont on disposait alors, il était impossible de découvrir autre chose.

La découverte de nouvelles propriétés de la matière suivit de près celle de nouveaux moyens plus puissants. L'électro-aimant donnait aux physiciens le moyen d'obtenir des effets magnétiques bien autrement puissants que ceux des anciens aimants. En 1846, Faraday, qui n'avait jamais cessé de s'occuper des phénomènes physiques produits par le champ magnétique, réussit à montrer que l'aimantation n'est pas un phénomène particulier à un petit nombre de métaux, mais que, de manières diverses, tous les corps y sont sujets. Un certain nombre de substances s'aimantent comme le fer, mais beaucoup plus faiblement ; d'autres, en très grand nombre, s'aimantent très faiblement, mais en sens inverse. Les gaz eux-mêmes sont sujets à des effets de ce genre.

C'était tout un nouveau champ d'études sur les propriétés de la matière. Comment

les propriétés magnétiques sont-elles liées à la composition chimique des divers corps ? Comment varient-elles avec leur état physique ? Sont-elles influencées par la température ? Autant de questions dont chacune appelait une longue série d'expériences délicates. Aussi, un grand nombre de recherches furent-elles publiées sur l'aimantation des corps dans les années du milieu du dix-neuvième siècle, parmi lesquelles une belle série de recherches d'Edmond Becquerel en 1849. De cet ensemble, qui contenait un nombre immense de faits particuliers, ne se dégagèrent pas encore de lois générales.

L OIS DE CURIE La question entra dans une nouvelle phase après le magistral travail publié par Curie en 1895 sous le titre : *Propriétés magnétiques des corps à diverses températures*. Le premier soin de Curie est de perfectionner les moyens de mesure, afin de pouvoir exprimer en nombres les propriétés magnétiques des corps les plus divers, et d'imaginer des méthodes permettant d'étudier ces propriétés dans toute l'échelle des températures. Il étudie alors les divers cas typiques : corps diamagnétiques comme l'eau, le soufre, le sel gemme, etc. ; corps faiblement magnétiques comme l'oxygène, le palladium, le sulfate de fer ; corps fortement magnétiques comme le fer et le nickel. Dans chaque cas, il démêle des lois simples. Pour les corps diamagnétiques, les propriétés sont indépendantes de la température ; le diamagnétisme semble une propriété primordiale et immuable de toute matière. Pour les corps faiblement magnétiques, l'aimantation diminue quand la température augmente, suivant une loi qui a conservé le nom de « loi de Curie ». Pour le fer et le nickel, les phénomènes sont infiniment plus complexes et liés aux transformations singulières, déjà découvertes par les métallurgistes, que subissent ces corps lorsqu'on les chauffe.

L E MAGNÉTON Le travail de Curie allait être le point de départ d'importantes recherches théoriques et de nouvelles expériences. En 1904, Langevin montrait que la loi de Curie est facilement expliquée, au moins pour les gaz, par l'agitation moléculaire qui empêche les molécules magnétiques de subir complètement l'orientation que le champ magnétique tend à leur imprimer ; il donnait en même temps une théorie du diamagnétisme, qui est dû à une sorte de phénomène d'induction sur les « courants particuliers » dont Ampère avait donné un premier aperçu après sa découverte de l'identité entre les effets des courants et ceux des aimants.

Du point de vue expérimental, le beau travail de Curie était loin d'avoir épuisé le sujet. Une longue série de mesures fut bientôt entreprise par Pierre Weiss (actuelle-

ment professeur à l'Université de Strasbourg) et par ses élèves. Toutes ces recherches sont guidées par l'idée atomistique. Si un corps est magnétique, c'est parce que sa molécule elle-même est comme un petit aimant ; si nous pouvions observer séparément une molécule d'oxygène, par exemple, nous la verrions s'orienter, comme le fait une aiguille aimantée, dans un champ magnétique, tandis qu'un atome de soufre ou de sodium ne subirait presque aucune action. Dès lors, il y a lieu, pour chaque atome, de chercher la valeur numérique du « moment magnétique » qui caractérise cette propriété. L'examen des résultats conduit à une conséquence extrêmement curieuse : les moments magnétiques des divers atomes ne sont pas répartis au hasard ; ils sont tous des multiples d'une même quantité, comme si tous les atomes magnétiques contenaient, à un certain nombre d'exemplaires, un même élément constituant, que Weiss a appelé le *magnéton*. C'est là un élément nouveau et fort important introduit dans la connaissance de l'atome ; les théories électroniques de l'atome n'en ont pas encore complètement rendu compte. Il s'en faut de beaucoup que l'atome nous ait livré tous ses mystères.

MAGNÉTO - OPTIQUE D'une manière indirecte, l'action du champ magnétique sur la matière se manifeste d'une autre manière, par les modifications qu'il introduit dans les propriétés optiques. C'est encore Faraday qui a ouvert cette voie, par sa découverte du pouvoir rotatoire magnétique, faite en 1846. Dès qu'un corps est placé dans un champ magnétique, il acquiert des propriétés optiques singulières ; lorsque de la lumière polarisée s'y propage, son plan de polarisation tourne progressivement, ou, en d'autres termes, la vibration rectiligne qui le constitue change progressivement de direction. Ce phénomène rappelait un peu celui que Biot et Arago avaient découvert dans les cristaux naturels de quartz et que Fresnel avait expliqué, mais avec d'importantes différences. La symétrie du phénomène n'est pas la même dans les deux cas, et cette différence se manifeste lorsque l'on examine successivement de la lumière se propageant dans les deux sens. Les premières lois du phénomène furent bientôt éclaircies après les recherches de Faraday lui-même, et en France celles de Verdet et des Becquerel. Chaque corps est caractérisé par une constante qui exprime son aptitude à produire la rotation, quantité qui est connue sous le nom de « constante de Verdet ». La chimie physique s'enrichit ainsi d'un nouveau chapitre, qui est loin d'être terminé.

Dans ce même chapitre des propriétés magnéto-optiques de la matière, une nouvelle voie a été découverte par Cotton et Mouton en 1907. Certaines substances, soumises au champ magnétique, n'acquièrent pas seulement les propriétés décou-

vertes par Faraday ; elles deviennent, de plus, biréfringentes, comme le sont ordinairement les corps cristallisés. Le phénomène est excessivement faible, du moins lorsqu'on le produit avec les moyens dont on dispose actuellement, mais cela n'enlève rien à l'intérêt qu'il présente.

Cette circonstance, et beaucoup d'autres, ont fait surgir de divers côtés cette idée qu'il y aurait le plus grand intérêt, pour les progrès de la physique, à pouvoir augmenter de beaucoup les intensités réalisables des champs magnétiques utilisés dans les recherches. Chaque nouveau progrès dans cette direction a été marqué par quelque importante découverte. Faraday n'aurait pas découvert le diamagnétisme ni le pouvoir rotatoire magnétique si Ampère et Arago n'avaient donné le moyen de décupler les intensités des champs magnétiques dont on disposait au moyen des aimants. Depuis l'époque de Faraday, ces intensités ont été à peine doublées ; si l'on pouvait, encore une fois, les décupler, des découvertes inattendues suivraient probablement. Un mouvement pour la réalisation de cette idée, réalisation qui n'aurait pu se faire sans d'importantes dépenses, commençait à se dessiner en 1914. Quelques mois après, la guerre venait nous absorber vers des préoccupations plus immédiates, et depuis il n'a guère été possible d'y penser.

V

LES APPLICATIONS

LE MOTEUR LÉGER ET L'AUTOMOBILE Le dix-neuvième siècle avait vu naître toutes les grandes applications de la vapeur et de l'électricité, et s'accomplir cette extraordinaire révolution industrielle et sociale résultant de la production et du transport de l'énergie mécanique en quantité qu'il eût été impossible d'imaginer au siècle précédent. La période contemporaine a vu se développer cette transformation, se perfectionner les techniques, sans qu'aucune grande idée nouvelle soit apportée. En ce qui concerne la production d'énergie mécanique, il faut insister seulement sur la solution définitive du problème du moteur léger, conduisant à l'invention de l'automobile puis à celle de l'avion.

Dès 1860, on avait le moteur à explosion qui devait conduire à ces grandes applications ; il était encore trop lourd pour qu'il pût servir à la traction d'une voiture sur route ; c'est par le vieux moteur à vapeur, qui avait fait ses preuves sur les

voies ferrées, que le problème fut d'abord résolu. En 1873, Amédée Bollée réalise une voiture à vapeur qui, bientôt, circule dans Paris ; construite à quelques exemplaires, elle trouve de rares acheteurs. De Dion, Bouton et Trépardoux, à partir de 1883, s'engagent dans la même voie et réussissent à créer une petite industrie. Mais, à partir de 1890, le moteur à explosion, alimenté par un combustible liquide et rendu de plus en plus léger par l'emploi de vitesses de rotation toujours plus grandes, commence à donner quelques résultats. Un concours organisé en 1894, avec une épreuve finale entre Paris et Rouen, attire vivement l'attention du public sur les nouveaux engins ; les moteurs à explosion y sont déjà en majorité. L'année suivante, une course de vitesse sur le trajet Paris-Bordeaux et retour consacre le succès du moteur à essence. Une industrie nouvelle se développe rapidement ; la France y occupe le premier rang pendant la période de création.

Cette industrie n'est pas seulement intéressante par la transformation qu'elle amène dans nos habitudes et jusque dans l'aspect de nos villes ; elle réagit sur d'autres industries et même sur la science pure. Le désir d'avoir un moteur toujours plus puissant et toujours plus léger oblige les techniciens à étudier des problèmes nouveaux ; tout l'art de la métallurgie en est bouleversé ; la science complexe et délicate connue sous le nom de métallographie en reçoit une vive impulsion. L'électrotechnique, la construction des machines-outils, toutes les industries qui utilisent les métaux en profitent largement ; le problème de l'aviation se présente enfin sous un aspect nouveau.

L'AVIATION La science pure, il faut bien le dire, a peu contribué à la naissance de l'aviation. Les recherches de Borda sur la résistance de l'air auraient pu être d'un grand secours dans les discussions qui précédèrent la réalisation de la machine volante ; elles étaient à peu près oubliées, et dans ces discussions, on cita plus souvent les résultats inexacts énoncés par Newton qui n'auraient guère laissé d'espoir de résoudre le problème. En 1809, l'Anglais Cayley, prenant comme bases les expériences de Borda, avait cependant esquissé une théorie mathématique qui mettait en évidence la possibilité de la sustentation dans l'air par la vitesse ; personne n'y fit attention, et ce remarquable travail était oublié lorsque commencèrent les premiers essais.

Bien plus que la théorie mathématique, c'est l'observation des oiseaux qui conduisit à envisager le problème du *plus lourd que l'air*. En vain pouvait-on dire que l'oiseau dispose d'un moteur remarquablement léger ; il suffisait de regarder pour voir que les grands planeurs volent avec une dépense de travail mécanique très

minime. Dès 1868, Hureau de Villeneuve, médecin et anatomiste, avait fondé le journal *l'Aéronaute* qui, à partir de 1872, devenait l'organe de la *Société française de navigation aérienne*, fondée comme conséquence de préoccupations nées de la guerre ; il parvenait à attirer l'attention publique sur le problème du vol, et faisait les premiers essais de construction d'oiseaux artificiels. Un jeune officier de la marine française, Alphonse Pénaud, s'occupait de la même question et, en août 1871, réalisait pour la première fois un minuscule aéroplane, jouet d'une rare ingéniosité, qui faisait des vols de quarante mètres de longueur. L'appareil pesait seize grammes, avait une longueur de cinquante centimètres, et comme propulseur une hélice mue par un fil de caoutchouc tordu. Pénaud, avant de mourir à trente ans, avait longuement réfléchi à la théorie du vol ; un de ses mémoires fut couronné, en 1875, par l'Académie des sciences ; c'est lui qui exhume le travail de Cayley, et, vingt ans plus tard, l'Américain Langley prendra comme point de départ les recherches de Pénaud.

On peut dire qu'à partir de ce moment l'attention publique est attirée sur l'étude du vol. Les belles recherches de Marey, en même temps qu'elles conduisent à l'invention du cinématographe, précisent les attitudes des oiseaux. De divers côtés, en France et en Angleterre, on construit de petits oiseaux mécaniques ; simples jouets, dira-t-on ; mais jouets qui maintiennent l'attention attirée vers un problème que l'on aurait cru insoluble.

Dans ce problème, il y avait en réalité deux questions distinctes : le problème du planeur et celui du propulseur. Ce dernier était lié au problème de l'hélice, déjà résolu, et du moteur léger, qui s'acheminait de jour en jour vers sa solution ; beaucoup moins avancé, du moins dans l'esprit de la plupart des hommes de science, était le problème du planeur. Il fallait démontrer la possibilité de sustenter un corps lourd par le seul effet de la vitesse, et c'est en cela que l'observation des oiseaux était instructive. Parmi les observateurs sagaces du vol, une place à part doit être faite à Louis Mouillard. Établi au Caire, où il vivait d'un modeste commerce de mercerie, Mouillard avait souvent admiré le vol des grands oiseaux d'Égypte qui venaient, jusque dans la ville, chercher leur nourriture ; il les avait regardés en artiste, il avait habilement saisi leurs attitudes, et avait longuement réfléchi à leurs procédés de vol. En 1881, il résuma ses observations dans un livre, *l'Empire de l'air*, qui fit quelque bruit et souleva beaucoup de critiques. Continuant ses observations, il composa un second livre, *le Vol sans battement*, qu'il ne put publier faute d'argent, et construisit même, en 1896, au Caire, un premier modèle d'avion sans moteur destiné à faire du vol plané. Il mourut pauvre et ignoré en 1897.

Cependant, Mouillard n'était pas le seul à s'orienter dans cette voie. A partir de 1891, l'Allemand Lilienthal commençait ses glissades aériennes, qui lui permettaient, en se lançant d'un lieu élevé, de parcourir plusieurs centaines de mètres ; il réussit plusieurs milliers de glissades, avant de se tuer dans un atterrissage malheureux, en 1896. Un Français établi en Amérique, Octave Chanute, qui connaissait les idées de Mouillard et avait été en correspondance avec lui, reprenait, la même année, des expériences analogues dans la banlieue de Chicago ; c'est en imitant Chanute que les frères Wright firent, toujours sans moteur, leurs premiers essais. En France, le sport de la glissade aérienne, précurseur indispensable de l'aviation, n'était pas non plus négligé, et avec Ferber, Archdeacon, et bien d'autres, conduisait à de remarquables résultats.

L'effet sustentateur de la vitesse était dès lors indéniable ; il devenait évident qu'en adaptant une hélice propulsive mue par un moteur léger à un appareil planeur, on le maintiendrait indéfiniment en l'air. Dans tout cela, les hommes de science, mathématiciens ou expérimentateurs, n'avaient joué presque aucun rôle. L'étude scientifique du problème, presque abandonnée depuis Borda, fut cependant reprise en 1891 par le physicien américain Langley, déjà célèbre par ses belles recherches sur les radiations infra-rouges et sur le rayonnement solaire ; par des méthodes analogues à celles de Borda, mais poussées beaucoup plus loin, Langley reprend l'étude expérimentale de la réaction de l'air sur les corps en mouvement. En 1896, suivant l'exemple de Pénaud, Langley construit un modèle d'aéroplane réduit, mais déjà imposant ; l'appareil pèse onze kilogrammes, ses ailes ont quatre mètres d'envergure, et son hélice est mue par un moteur d'un cheval ; l'appareil parcourt en vol un trajet de neuf cents mètres. Langley, continuant ses essais, construit des modèles de plus en plus grands et, en 1903, fait essayer un appareil portant un homme, lancé sur le fleuve Potomac. L'expérience échoue, la machine tombe à l'eau et Langley, découragé par les railleries de la presse de son pays, renonce à une science dont il avait posé les bases.

Cependant, la possibilité du vol avait été déjà démontrée en France dès 1897 par Ader, qui avait construit *l'avion* que l'on peut voir encore au Conservatoire des arts et métiers, et l'avait essayé au camp de Satory, près de Versailles. L'appareil, qui comportait tous les organes de l'avion moderne, s'éleva nettement au-dessus du sol, mais fut détérioré en reprenant le contact avec la piste ; l'autorité militaire, qui avait aidé l'inventeur par d'importantes subventions, déclara que l'invention n'était pas au point et cessa de s'y intéresser.

On ne peut citer ici les nombreux essais qui, en quelques années, devaient con-

duire à la solution complète du problème. C'est seulement à partir de 1908 que de véritables vols, dépassant quelques minutes, furent obtenus. Le 25 juillet 1909, Blériot traverse la Manche. A partir de ce moment, tous les principes étaient trouvés, et le développement de l'aviation devenait une question de construction et d'industrie.

LES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES ET LA TÉLÉGRAPHIE SANS FIL Les grandes applications de l'électricité, dont on a esquissé l'histoire au chapitre précédent, faisaient toutes appel au transport d'énergie à travers le circuit électrique ; tous les appareils mis en action devaient être réunis par une chaîne ininterrompue de conducteurs, et l'on pouvait difficilement concevoir qu'il en fût autrement.

Cependant, Clerk Maxwell, dans son mémorable *Traité d'électricité* (1873), avait déjà étudié la propagation d'une perturbation électromagnétique à travers l'espace et, sans nouvelles expériences, montré que cette propagation doit se faire avec la vitesse de la lumière. La plupart des physiciens français ne donnèrent malheureusement pas à cette théorie toute l'attention qu'elle méritait, jusqu'au jour où le physicien allemand Hertz parvint à montrer par une expérience directe la réalité d'une telle propagation (1889). L'attention fut alors vivement attirée vers les ondes électromagnétiques ; de tous côtés, les expériences de Hertz furent répétées, discutées, perfectionnées et étendues. Chez nous, le grand mathématicien Henri Poincaré, alors dans tout l'éclat de son génie, contribua largement à faire accepter, tout en les discutant et les précisant, les idées de Maxwell ; une belle moisson d'expériences nouvelles fut le fruit de ce mouvement, parmi lesquelles il faut citer particulièrement celles de Blondlot, qui donnaient une mesure directe et précise de la vitesse de propagation.

Déjà les expériences de Hertz réalisaient, à très petite distance, il est vrai, un échange de signaux sans fil entre l'appareil émetteur et l'appareil récepteur, tous deux d'une étonnante simplicité, le premier constitué par deux conducteurs métalliques entre lesquels on faisait jaillir une étincelle, le second par un cerceau de fil de cuivre portant une étroite coupure où jaillissait par induction une minuscule étincelle. Ce récepteur était si peu sensible qu'il n'y avait guère d'espoir d'utiliser pratiquement ce mode d'échange de signaux.

Dès l'année suivante (1890), un phénomène très curieux découvert par Branly allait donner un détecteur infiniment plus sensible. Un tube plein d'une limaille métallique (que plus tard on appellera un *cohéreur*) ne se laisse pas traverser par le courant d'une pile, à cause du manque de contact entre les grains de métal ; une étincelle électrique jaillissant à quelque distance du cohéreur le rend immédiatement conduc-

teur. Entre les deux appareils, étincelle et tube de limaille, il y a possibilité d'échange de signaux, sans aucun lien matériel ; Branly obtint un effet à quarante mètres de distance, à travers murs et cloisons.

L'expérience est reprise de divers côtés, en particulier par l'Anglais Lodge, qui aperçoit le lien entre le phénomène de Branly et les ondes hertziennes provenant de l'étincelle, et qui devine la possibilité de communications à quelque distance. Puis vient, de divers côtés, l'idée d'accroître l'émission et d'améliorer la réception par l'emploi d'une *antenne* ; en 1895, le Russe Popoff utilise le cohéreur de Branly à l'étude des décharges atmosphériques lointaines. L'année suivante, un tout jeune physicien italien, Marconi, encore étudiant à l'Université de Bologne où il travaillait sous la direction de Righi, un des maîtres de la science des ondes électromagnétiques, entreprend, avec une rare hardiesse, l'application des ondes électromagnétiques aux communications lointaines. En quelques mois, des communications à plus de vingt kilomètres sont obtenues.

Ces expériences eurent un immense retentissement ; un travail collectif intense, où tous les pays participèrent, amena un rapide perfectionnement d'une technique entièrement nouvelle et encore dans l'enfance. A ce développement, notre pays prit une part active et brillante, en grande partie en vue des besoins de la marine et de l'armée. En 1914, la télégraphie sans fil avait déjà atteint un haut degré de perfection ; la guerre allait donner, sous l'empire de la nécessité, une occasion de perfectionnements nouveaux et importants, sous l'impulsion du général Ferrié qui avait su grouper autour de lui un grand nombre de collaborateurs éminents. Aujourd'hui, la téléphonie sans fil est devenue, à son tour, un problème résolu, et les grands postes de radio-télégraphie étendent leurs communications à travers la terre entière jusqu'aux antipodes.

Un problème d'une importance historique considérable s'est trouvé, du même coup, résolu d'une manière vraiment inattendue. On a vu, au cours de cette histoire, l'importance du problème des longitudes, que les progrès de l'horlogerie, après un siècle d'efforts, avaient à peu près résolu. En donnant le moyen de transmettre à travers le globe, d'une manière pratiquement instantanée, un signal qui peut être perçu sur la terre entière, les ondes électromagnétiques résolvent ce problème de l'heure universelle et par suite celui des longitudes, aussi bien sur terre que sur mer ; c'est là l'utilité principale de ces *signaux horaires*, qui sont transmis par un certain nombre de postes, et en particulier par celui de la tour Eiffel ; tous les navires peuvent ainsi chaque jour recevoir l'heure du premier méridien et, par une simple observation astronomique, résoudre le problème dont s'étaient occupés tant de physiciens et de géomètres du dix-septième et du dix-huitième siècle.

VI

CONCLUSION Arrivés au terme de cette longue route, jetons un coup d'œil en arrière pour essayer de caractériser en ses diverses époques la physique de notre pays.

Et d'abord, peut-on parler d'une physique française ? D'une manière absolue, évidemment non. Vouloir représenter notre science comme repliée sur elle-même, fermée aux influences extérieures, ne recevant rien et ne rayonnant pas, l'imaginer, pour parler le langage des physiciens, comme un *système isolé*, cela serait la calomnier et non pas la grandir. Toujours ouverts aux suggestions du dehors, toujours prêts à semer les idées, nos physiciens ont, au contraire, largement participé, par un double courant de découvertes et d'idées, au mouvement scientifique universel.

Notre dix-septième siècle, dans sa première moitié, peut être appelé l'époque des philosophes. Avec les données du sens commun et les rudiments d'expériences que l'on possède, on discute sur tout, on passe souvent à côté de la vérité, mais on introduit, à la suite de Descartes, une grande nouveauté : l'application des mathématiques à l'étude des phénomènes naturels. C'est de l'extérieur que nous viennent d'abord les résultats de l'expérience et les progrès techniques ; c'est Galilée qui nous apprend les lois expérimentales de la chute des corps, c'est de Torricelli que Pascal tient l'expérience du vide, c'est de Hollande et d'Italie que nous viennent les lunettes. Mais c'est chez nous que les propriétés des fluides trouvent leur expression définitive et que l'on commence à dégager les principes de la mécanique. La seconde moitié du dix-septième siècle voit en France le magnifique développement de l'art des observations en astronomie et en géodésie, et les méthodes créées pour un but particulier réagissent sur toutes les sciences expérimentales.

Cependant, l'art des expériences intéresse de plus en plus nos milieux scientifiques et même notre public ; notre dix-huitième siècle pourrait être appelé l'époque des bons ouvriers, tandis que, par un curieux mouvement de bascule, les idées générales semblent venir de l'étranger. Le grand nom de Newton domine toute la physique et même toute la science du dix-huitième siècle ; c'est chez nous que les idées du grand Anglais, après la période d'incompréhension, trouvent leurs plus belles applications.

La fin du dix-huitième et le commencement du dix-neuvième siècle, à travers



SERVICE POSTAL PAR AVIONS A L'AÉRODROME DU BOURGET
 (Avion Farman. Lignes Paris-Londres et Amsterdam)

la période politiquement si troublée de la Révolution et de l'Empire, représentent l'époque la plus brillante de la physique française. Elle est occupée par la belle génération d'hommes élevés dans le milieu brillant du dix-huitième siècle et par leurs successeurs immédiats. Parfois les faits nouveaux viennent du dehors ; presque toujours ils trouvent chez nous leur coordination harmonieuse et définitive. En cinquante ans, nous trouvons Coulomb et les lois de l'électro-statique, Fresnel et l'optique ondulatoire, Fourier et la propagation de la chaleur, Ampère et l'électrodynamique, Sadi Carnot et la thermodynamique, le système métrique, les aérostats.

Après cet effort, il semble que la physique française ait épuisé pour un temps ses facultés créatrices ; la génération suivante, trop absorbée dans l'admiration de ses aînés, semble incapable d'imaginer des techniques nouvelles, connaît mal le mouvement scientifique de plus en plus intense des pays voisins, et se laisse devancer. C'est d'Angleterre et d'Allemagne que nous reviennent, complétées, les idées de Sadi Carnot, c'est en Angleterre que s'achève l'électro-magnétisme ; et, comme il n'est guère d'applications sans science, c'est surtout à l'étranger que se perfectionnent la machine à vapeur et les premières applications de l'électricité.

Le désastre de 1870 nous réveille ; de nouvelles publications scientifiques sont fondées, une nouvelle génération se met au travail, on commence à comprendre les nécessités de la recherche expérimentale ; mais il faut du temps pour que cet effort produise ses fruits. Dans le mouvement scientifique universel, de plus en plus intense, la France reconquiert enfin une place enviable. C'est de chez nous, avec Becquerel et Curie, que part le grand courant créé par la découverte de la radio-activité. La curiosité publique est, de plus en plus, attirée vers les résultats de la recherche scientifique, et les conditions matérielles encore médiocres dans lesquelles cette recherche est faite ne la laissent plus indifférente.

C'est qu'un magnifique avenir semble aujourd'hui s'offrir au physicien. On a pu croire, à certaines époques, que tout était découvert, et qu'il ne restait plus qu'à explorer dans le détail le pays conquis ; nous sommes loin d'avoir cette impression décourageante ; il nous semble, au contraire, que plus le terrain connu est vaste, plus les frontières de l'inconnu sont étendues et plus de moyens s'offrent au chercheur pour y pénétrer. Il serait bien dangereux d'affirmer que les tendances actuelles se continueront indéfiniment ; essayons du moins d'indiquer les directions dans lesquelles semble se développer le progrès de la physique.

Ce qui frappe tout d'abord c'est l'extraordinaire importance donnée aux phénomènes électro-magnétiques. Ils ont fini par si bien tout envahir qu'on les prend comme base, comme phénomène initial irréductible, au lieu d'essayer de les expli-

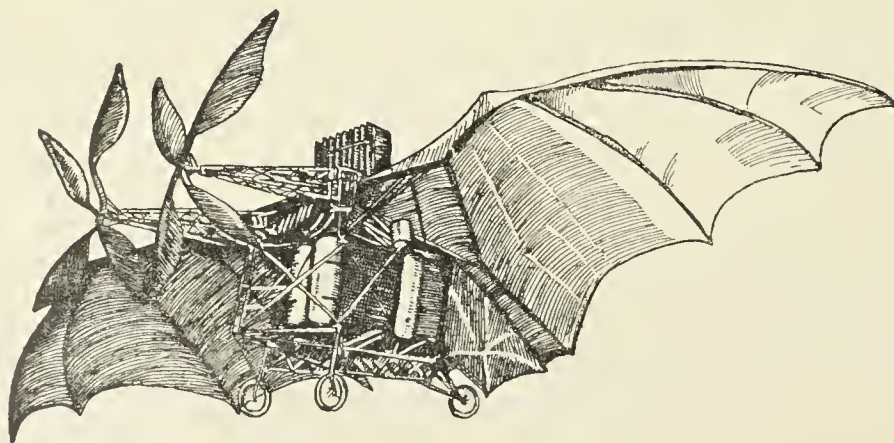
quer. L'optique est absorbée par l'électro-magnétisme ; la mécanique elle-même, fondement de la physique newtonienne, résiste mal à l'annexion.

D'autre part, l'atomisme prend une précision, une réalité inattendue ; il pénètre même le domaine électro-magnétique et l'électron, l'atome d'électricité, devient l'élément fondamental de tout le monde matériel.

Enfin, les idées même d'espace et de temps sont, dans les théories relativistes, soumises à une révision dont bien des esprits avaient entrevu la nécessité, mais que personne n'avait osé pousser jusqu'au bout.

Tout cela forme aujourd'hui un magnifique ensemble, dans lequel on entrevoit une fusion de toute la physique et de toute la chimie ; et cependant, il faut bien le dire, le mystère qui enveloppe l'univers n'est que reculé ; le champ électro-magnétique, l'atome d'électricité, posés comme postulats initiaux, nous restent impénétrables.

Le mystère subsistera, sans doute, toujours ; mais les phénomènes, toujours plus nombreux, se classent de mieux en mieux, autour de notions fondamentales de moins en moins nombreuses, et nos moyens d'action sur ce qui nous entoure deviennent de plus en plus profonds. Le progrès de la science n'est pas autre chose que cela. Puisse notre pays y contribuer dans l'avenir aussi brillamment que dans le passé.



HISTOIRE DES SCIENCES EN FRANCE

TROISIÈME PARTIE

HISTOIRE DE LA CHIMIE

PAR

ALB. COLSON

PROFESSEUR DE CHIMIE A L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE

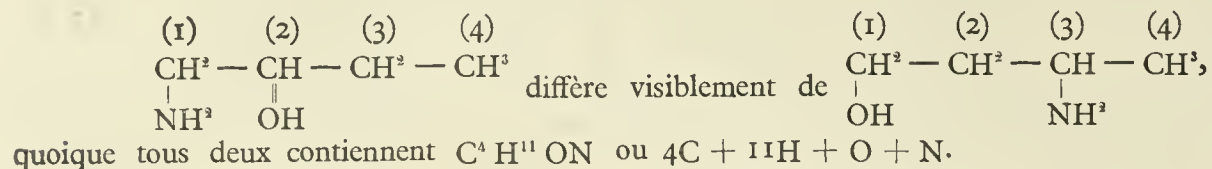


AVANT-PROPOS



LA seule énumération des Mémoires des chimistes français depuis Lavoisier exigerait un volume. Notre choix a été dicté par la valeur des résultats et par leur rôle dans l'évolution de la chimie. En insistant sur les idées, qui toujours dominent les faits, nous avons voulu marquer la part de l'intuition, c'est-à-dire de cette claire vision de causes ou d'effets qui échappent au vulgaire. C'est ce don précieux qui fit pressentir à Lavoisier les lois fondamentales de la chimie et ses méthodes caractéristiques, et l'amena à jeter les bases de la belle langue scientifique qui résume cette science. C'est par intuition que Dalton a conçu le principe de la notation, langue écrite non moins admirable que la nomenclature. Avec les expériences de Gay-Lussac et les interprétations d'Avogadro et d'Ampère, l'école de Dumas a fait de la notation un mode de suggestions illimitées et un procédé d'exposition plus facile à lire qu'à parler. Ainsi en chimie organique, où les groupes constitutifs des molécules, séparés par des tirets qui figurent des barres d'attache, sont souvent numé-

rotés, on ne peut guère épeler le nom des composés en dehors de leur formule. Par exemple :



On trouvera dans ce travail les noms d'illustres savants étrangers mêlés à ceux de nos maîtres. Le contraire serait surprenant, car la vie intellectuelle, comme toute autre branche de l'activité humaine, est si enchevêtrée qu'il est impossible de distinguer l'apport de chacun dans la somme des résultats.



L'HERMAPHRODITE CHIMIQUE (L'UNION DU SOUFRE ET DU MERCURE, LE MARIAGE PHILOSOPHIQUE)
(D'après le *Viatorium Spagyricum*).



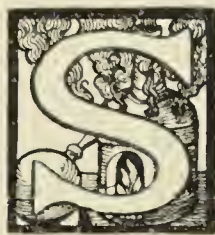
CHAPITRE PREMIER

LAVOISIER ET LA CHIMIE MINÉRALE

I. L'alchimie. — II. L'œuvre de Lavoisier : air; — eau; — méthodes; — éléments; — Classification minérale; — Nomenclature et notation. — III. Impulsion scientifique : Recherche d'éléments nouveaux. — Lois pondérales. — Théorie unitaire de Davy. — Atomes de Dalton et Lois de Gay-Lussac. — Analogies chimiques : Isomorphisme et chaleur spécifiques. Analyse spectrale. — IV. Action des idées de Lavoisier sur l'industrie : Acide sulfurique et industries qui en dérivent. — Soude et verre. — Chlore et dérivés. — Chimie agricole. — Outremer. — Pierres précieuses.

I

L'ALCHIMIE



Si la chimie est l'art de changer la nature des corps, c'est avec raison que Dumas reconnaît, dans sa *Philosophie chimique*, que les premiers chimistes furent des artisans : potiers, verriers, forgerons, etc. Mais il y a loin de ces arts, même perfectionnés, à la chimie scientifique, qui ne date que d'hier. Pour classer les faits et en tirer des conclusions, il était nécessaire que les applications prissent un développement suffisant ; il fallait encore des connaissances physiques, une liberté d'esprit capable de dominer les préjugés que chaque siècle apportait avec lui, et une claire définition de la matière.

Il semble que les premières conceptions théoriques soient dues à un peuple qui, dès la plus haute antiquité, avait tout organisé. On sait combien les savants attachés à l'expédition de Bonaparte en Égypte furent frappés des connaissances approfondies des anciens Égyptiens. En particulier, la perfection et la décoration des verres, l'éclat et la variété des couleurs conservées dans les tombeaux, révélaient une chimie déjà perfectionnée. Ces connaissances formaient le patrimoine intellectuel de la caste sacerdotale et demeuraient cachées sous un symbolisme dont les initiés seuls avaient la clef. Elles ont été apportées en Occident par les Arabes, qui les avaient puisées au foyer rayonnant d'Alexandrie. Ce fut surtout Djeber ben Hafan, le Géber des alchimistes, qui nous les a transmises. Son influence était encore reconnue par un savant admiré de Voltaire, Nicolas Lémery. Géber enseignait la transmutation des métaux et affirmait l'existence de cinq principes des choses naturelles : l'eau, l'esprit, l'huile, le sel et la terre. Mais l'esprit, qu'on appelait mercure, et l'huile, qu'on appelait soufre, n'étaient point les corps visibles et tangibles connus du vulgaire ; c'étaient des substances d'une pureté parfaite, le mercure et le soufre des philosophes, que personne, sauf quelques adeptes de l'art hermétique, n'avait pu isoler.

Ces doctrines ont dominé l'alchimie du moyen âge. Leur imprécision, autant que l'évocation de corps insaisissables et inaperçus, les soustrayait à toutes les contradictions. Elles constituaient un formidable obstacle à l'édification d'une science. En dépit de leur habileté expérimentale et d'audacieux essais, les alchimistes prédécesseurs de Lavoisier ne parvinrent pas à grouper les innombrables faits accumulés pendant des siècles de recherches assidues. Aucune méthode, aucune loi, ni même l'ébauche d'une classification ne se dégagèrent de tant d'efforts jusqu'au moment où Beccher et Stahl (Allemands) tentèrent, à l'aide de la théorie du phlogistique, d'accorder ces contradictions. A la vérité, les nécessités de la métallurgie avaient conduit à rattacher les métaux aux terres (nous disons aujourd'hui : aux oxydes) ; mais l'éclaircissement de cette simple question, point de départ de la science, fut laborieux. En vain des éclairs de génie vinrent illuminer la véritable voie ; on retombait invariablement dans l'ombre la plus noire.

En pleine Renaissance, en l'an 1630, Jean Rey, médecin du Bugue en Périgord, et savant « chymiste », explique, avec une clarté et une précision admirées de Lavoisier lui-même, la formation des terres par la fixation de l'air sur les métaux. Conscient de la valeur de sa découverte, Rey proclame « que la vérité qu'il vient de tirer des plus profonds cachots de l'obscurité a fait suer de doctes hommes qui la voulaient acointer : Cardan, Scaliger, Fachsius, Césalpin, Libavius », et qu'enfin

il a le premier frayé le seul chemin susceptible de mener au but. « Mais Descartes ni Pascal n'avaient point alors paru ; on ne connaissait ni le vide de Boyle ni celui de Torricelli, et la physique n'existait pas », a dit Lavoisier.

Cette remarque, qui montre à quelle hauteur Jean Rey s'élevait au-dessus de ses contemporains, explique aussi pourquoi ce précurseur a été méconnu ; il heurtait trop vivement les idées reçues. Maintenant que nous sommes familiarisés avec la physique, la notion de matière pesante nous paraît naturelle. Au contraire les contemporains de Jean Rey n'attachaient aucune importance au changement de poids. Ils l'expliquaient d'ailleurs de maintes façons. La première explication reposait, comme dans tous les temps, sur l'autorité des maîtres. Or, Géber, le maître des maîtres, avait proclamé qu'au cours de la transmutation les métaux ne conservent pas leur poids propre, mais qu'ils l'échangent pour un autre poids par le magistère de l'art. En outre, à cette époque, nul ne mettait en doute que l'esprit, attiré par les astres, allège le corps, qui s'alourdit corrélativement quand l'âme en est séparée par la mort. Admis sans preuves (même par Léonard de Vinci) et transporté dans le domaine matériel, cet axiome permettait de conclure que le plomb vif s'alourdissait en se transformant par la chaleur en terre morte ou damnée (oxyde de plomb).

Le cas de l'Anglais Jean Mayow montre, mieux encore que celui de Jean Rey, combien il est difficile de sortir d'une ornière et d'imposer des vues nouvelles. En 1671, Mayow avait retrouvé les conclusions de J. Rey, et les avait développées en les appuyant sur des expériences qui sont frappantes, quand on les dégage de certaines obscurités expérimentales et de la préoccupation d'expliquer l'élasticité de l'air, que Boyle venait de découvrir. Mayow affirmait non seulement que l'air renferme des particules igno-aériennes destinées à entretenir la combustion, mais encore que leur absorption par le corps qui brûle entraîne la diminution du volume de l'air et laisse un résidu impropre à la combustion.

Si une flamme emprisonnée sous une cloche s'éteint, c'est, affirmait-il, faute de particules igno-aériennes actives (faute d'oxygène), et non par l'action de la suie, comme on le croyait. Après avoir ainsi précisé les idées de J. Rey, Mayow ajoutait que l'esprit de nitre (acide nitrique), qui sert d'aliment au feu, donne, en s'unissant au soufre, un acide identique à celui que fournit ce corps en absorbant les particules igno-aériennes de l'air ; donc, conclut-il, cet acide renferme les mêmes particules actives que l'air. Dans son *Traité de la respiration*, Mayow constate encore que l'air perd de sa force élastique par la respiration des animaux grâce à l'absorption des particules igno-aériennes qui changent le sang noir en sang rouge ou artériel.

Ces expériences et ces déductions établissent à nos yeux la composition de l'air, celle des acides et expliquent la respiration. Elles sont postérieures à Descartes et à Pascal et contemporaines de Boyle. Ce n'est pas dans une simple lettre qu'elles se trouvent relatées ; elles ont été l'objet de Mémoires imprimés à Oxford, à Londres et à Leipzig. Elles furent reproduites dans une brochure de Giovannini, parue à Toulouse en 1685, et dans les leçons de Barbieri à Bologne, telles que Hooke, disciple de Mayow, les avait exposées en 1682 devant la Société royale de Londres.

Pourquoi, malgré cette publicité, les idées de Mayow retombèrent-elles dans les ténèbres et l'oubli le plus profond ? C'est qu'à la fin du dix-septième siècle on confondait encore deux ordres d'idées qui n'ont rien de commun : la religion et la science. L'emprise de la première se manifestait en tout. Les vérités religieuses comptaient seules, et, en chimie même, l'appui d'un texte sacré apparaissait comme une sanction scientifique contre laquelle ne prévalaient ni les expériences ni la raison. Voici un exemple tiré de l'*Alphabet minéral* de Beccher, dédié à Boyle en 1682 : « Il existe, dit l'auteur, deux sortes de matières : une subtile ou *spirituelle* et une autre grossière ou *corporelle*; de là vient soit l'esprit, soit le corps. » Puis il conclut que *toute créature est terre* et qu'elle peut *redevenir terre ou être changée en terre*. Il est difficile de ne pas rapprocher cet adage du *Memento, homo, quia pulvis es et in pulverem reverteris*, d'autant plus que dans sa *Physique souterraine*, publiée en 1669 et rééditée en 1735, Beccher affirme que tout est formé du ciel et de la terre, puisque Dieu a créé le ciel et la terre.

A ces bizarreries, se mêlaient celles des éléments d'Aristote, et celles du mercure et du soufre des philosophes, qui rattachaient les métaux aux cinq principes des choses naturelles énoncés par Géber et reproduits, en 1715, dans la dixième édition du célèbre *Cours de chymie* de Lémery. Ces notions, dont nous ne donnons ici que les moins contradictoires, étaient la pâture et constituaient la science de la jeunesse studieuse, pour laquelle l'adage : *quia magister dixit*, tenait trop souvent lieu de raison suffisante.

Cependant, l'autorité dominante à cette époque, celle de Boyle et de son école, était basée sur des expériences, malheureusement défectueuses, quoique incontestées. L'Anglais Robert Boyle, contemporain de Mayow, auquel il survécut, admettait, conformément à la physique d'Aristote, que le feu est un élément très subtil, capable de pénétrer dans les corps compacts et solides et d'en accroître la masse et le poids. Ses propres expériences à ce sujet avaient convaincu ses contemporains ; l'autorité de cet illustre physicien a contribué pour beaucoup au rejet et à l'oubli des idées de Rey et de Mayow, et a préparé le succès de la théorie du phlogistique.

L'Allemand Stahl, élève de Beccher et médecin du roi de Prusse, répandit cette théorie ; il l'appuyait sur la croyance en un élément insaisissable (phlogiston) contenu



UNE LEÇON D'ALCHIMIE
(D'après une gravure allemande du ^{xiv}e siècle).

dans les métaux, qu'il considérait alors comme des corps composés, et même des terres composées unies au phlogistique, et parfois au soufre commun et combustible. Ainsi le fer, le plomb, l'étain ne devaient leur état métallique qu'à l'absorption du phlogistique par une calcination préalable ; l'or et l'argent contenaient en outre du soufre en proportions différentes ; et le soufre commun résultait, selon Stahl, de l'union du phlogistique à l'acide sulfurique.

Cette théorie, qui ne froissait aucune des idées à la mode, obtint un très grand succès au dix-huitième siècle. Propagée à Paris par la parole et le traité de Lémery, elle était encore considérée en 1757 par Macquer et Baumé

comme « la plus grande et la plus sublime conception de tous les chimistes physiciens ». Cependant la cause principale d'une telle faveur tenait moins à une conception, sur laquelle les deux novateurs, maître et élève, étaient en désaccord,

qu'à leur affirmation souvent répétée que l'expérience seule « relie, affermit et démontre une déduction et une connexion ». La proclamation de cette nécessité n'empêchait d'ailleurs pas Beccher d'invoquer la création d'Adam et d'Ève pour montrer que la terre joue le rôle de mâle, et l'eau celui de femelle.

Quant aux preuves expérimentales que Stahl croyait donner *ad nauseum*, elles consistaient surtout en citations entremêlées de faits, dans lesquels entraient en jeu des substances mal définies, huiles, terres, métaux ; ou imaginaires comme le phlogistique, résultant tantôt d'une calcination, tantôt d'une combustion, de sorte qu'il serait impossible de dire à quel point la saine logique et l'esprit de finesse étaient bannis de cette façon de concevoir l'expérimentation.

II

L'ŒUVRE DE LAVOISIER

Fermer les yeux devant ces incohérences afin de réduire l'œuvre de Lavoisier à la question de l'accroissement du poids des métaux par la calcination et de n'en faire que le contrepied de la théorie de Stahl dénote la mentalité du professeur Ostwald. Cet Allemand n'explique pas d'ailleurs comment la formation de l'oxyde d'argent par addition d'oxygène au métal est le contre-pied de la constitution attribuée à l'argent par Stahl, qui suppose ce métal formé de terre, de phlogistique et de soufre commun. Il se garde également de dire ce que devient l'hydrogène de l'huile de vitriol transformée en soufre par simple union avec le phlogistique.

Auteur d'un livre sur l'art de fabriquer les grands hommes, Ostwald sait mieux encore défaire les réputations. Le cas de Lavoisier est typique : en réalité, il suffit à Ostwald de subordonner l'œuvre de ce maître à la découverte de l'oxygène, puis il l'accuse d'avoir dérobé cette découverte à Priestley ; en réalité, c'est un Français, Bayen, qui, le premier, a indiqué à l'Académie des sciences l'existence de ce gaz, tiré de l'oxyde de mercure, ce qui permit à Lavoisier de « déchirer le voile soulevé par Bayen ».

LA MATIÈRE En 1773 on n'avait pas encore nettement distingué une transformation chimique d'un changement d'état physique. Alors que le passage de l'état liquide à l'état solide nous paraît aujourd'hui

si naturel, de nombreux contemporains de Lavoisier croyaient que la solidification du mercure constituerait un progrès important dans la transmutation de ce *vif argent* en argent solide. Aussi la solidification du mercure par le froid, réalisée à Saint-Petersbourg en 1759, fut-elle un événement comparable à la liquéfaction des gaz. Ce qui surtout augmentait les difficultés, c'était l'inexistence d'une définition précise de la matière. Ce mot semblait désigner tout ce qui tombe sous les sens : la chaleur, la lumière. A ce titre, ces agents devaient faire partie intégrante des corps. C'était bien ce que Boyle entendait en supposant que les métaux calcinés augmentent de poids en absorbant le principe subtil de la flamme. C'était la même conception, appliquée en sens contraire, qui régissait l'œuvre de Stahl, avec cette aggravation que les variations de poids n'avaient aucune importance pour ce dernier. En définissant la matière par la propriété d'être pesante, et en appuyant cette définition sur la pratique de la balance, qu'il avait mis tous ses soins à perfectionner, Lavoisier circonscrivit le champ de la



LAVOISIER (1743-1794) LA VEILLE DE SA MORT
(D'après un tableau de la collection Louis David, ayant appartenu à Raspail).

chimie ; il en élimina les impondérables. Sa fameuse loi de la conservation de la matière : « Rien ne se perd, rien ne se crée », en a fixé les bornes qui resteront immuables, tant qu'on poursuivra l'étude de l'action mutuelle des corps matériels, et tant que l'analyse chimique servira de guide dans cette voie. Telle est la profondeur de ce principe qu'il s'est étendu ensuite à la mécanique et à la physique (conservation de l'énergie). C'est lui qui est journellement appliqué dans les équations chimiques, précisées par la théorie atomique de Dalton.

Pour arriver à ce résultat capital, il ne suffisait pas de prendre le contre-pied

de la doctrine de Stahl, il fallait surtout établir que celle-ci allait à l'encontre des expériences les mieux conçues, et qu'il en était de même des affirmations de Boyle, concernant la pesanteur du calorique. Parmi les expériences remarquables de Lavoisier, nous choisirons celles qu'il opposait à Priestley (Anglais), à Scheele (Suédois) et à Boyle. Le précipité *per se* (1), loin de gagner quoi que ce soit en reprenant l'état métallique, comme le prétendait Scheele, perd le dixième de son poids, d'après les pesées rigoureuses de Lavoisier. Au contraire, en calcinant l'étain en atmosphère confinée, le métal, au lieu de s'alléger par perte de phlogistique, foisonne et augmente de poids à mesure que l'air disparaît. De la mesure du volume d'air absorbé, Lavoisier en déduisait le poids et constatait qu'il était constamment égal à l'accroissement du poids de l'étain. C'était donc l'air et non le phlogistique ou le calorique pesant qui entraînait en jeu.

A Priestley, qui affirmait que l'air ordinaire est de *l'air vital* (oxygène) auquel le mercure calciné a cédé son phlogistique, Lavoisier montre que la formation du précipité *per se*, en se faisant au sein de *l'air vital*, absorbe progressivement celui-ci ; mais « la preuve que le mercure ne fournit rien à l'air, c'est que *l'air vital* qui reste dans la vessie est aussi pur à la fin qu'au commencement de l'expérience. Il ne s'échappe donc pas du mercure une émanation phlogistique, comme le pensent le docteur Priestley et plusieurs autres chimistes ».

Quant à l'expérience indiscutée de Boyle relative à l'augmentation de poids par emmagasinement de chaleur, voici les expériences de Lavoisier qui tranchèrent la question. Que la chaleur soit transmise de l'extérieur (calcination de l'étain et du plomb) ou qu'elle se produise par la combustion des corps, déterminée en concentrant sur eux des rayons solaires au moyen d'une loupe, le ballon hermétiquement clos ne change de poids à aucun moment, quel que soit le dégagement de lumière et de chaleur. Dans le cas du charbon, celui-ci se retrouve intégralement à l'état d'acide carbonique, dont Black (Écossais) venait d'étudier magistralement les propriétés. Ces expériences, conçues dès 1772, étaient terminées en 1777. La lumière et le feu ne sont donc que des manifestations impondérables du changement d'état de la matière pesante.

Cependant, dans le cas du charbon, il restait toujours un résidu auquel les chimistes du dix-huitième siècle persistaient à accorder une importance capitale en l'envisageant comme le squelette du charbon. Lavoisier pressentit que ce résidu provenait de matières étrangères au charbon ; mais l'analyse du gaz carbonique

(1) Oxyde rouge de mercure.

était alors impossible ; Gay-Lussac, Dumas, Regnault n'étant point nés, on était loin de connaître les lois des combinaisons gazeuses, la composition exacte de l'eau et du gaz carbonique, et la valeur rigoureuse des densités gazeuses.

Lavoisier sortit de cette impasse en montrant que le charbon absolument pur brûle sans résidu. Mais où trouver ce corps exceptionnel ? Lavoisier eut l'intuition que le diamant, dont la transparence et la forme cristalline accusaient la pureté, était ce corps idéal ; et il montra que cette variété de charbon, brûlée dans l'oxygène en vase clos, ne laisse point de résidu et fournit du gaz carbonique, comme ses similaires (1772). Ainsi, Lavoisier passait par-dessus l'analyse, et indiquait la méthode que cinquante ans plus tard Dumas réalisait d'une manière impeccable en faisant la synthèse pondérale du gaz carbonique, fondement de l'analyse élémentaire des corps organiques.

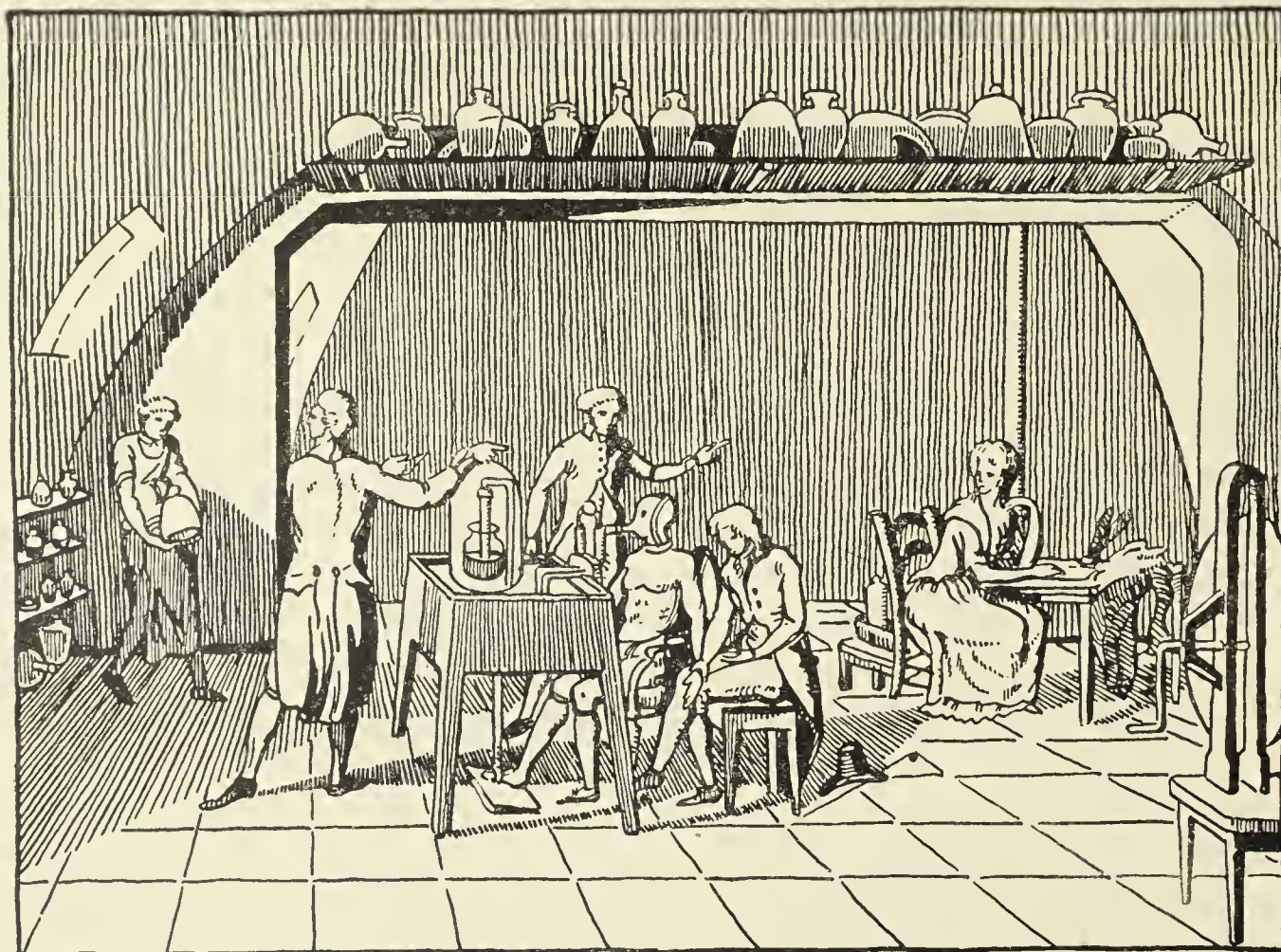
ANALYSE DE L'AIR

En remplaçant par des bases aussi solides les assises branlantes que Stahl avait données à la chimie, Lavoisier avait certainement fait une belle œuvre ; mais elle n'eût pas suffi à lui mériter le titre de Père de la chimie. Pour être considéré comme tel, il fallait encore apporter à cette science ses méthodes et en indiquer les voies essentielles. L'étude de l'air atmosphérique allait amener Lavoisier à ce résultat. Tout le monde connaît sa célèbre expérience concernant l'analyse de l'air. En chauffant une masse déterminée d'air au contact du mercure, le volume gazeux diminue à mesure que le métal se recouvre d'une pellicule rouge, le gaz résiduel devient impropre à la vie et à la combustion, d'où le nom d'*azote* que lui donna Lavoisier. La partie active de l'air est complètement condensée dans la poudre rouge qui surnage le mercure. Elle s'en dégage par une surélévation de la température et restitue intégralement le volume gazeux disparu dans la première partie de l'opération ; il n'y a donc aucun doute : l'air n'est pas un élément, mais « il est la somme de deux parties, qui sont deux fluides aériformes très différents » : l'azote inactif, sorte de mofette (1774), et l'oxygène actif surexcitant les combustions et la vie.

SYNTHESE DE L'AIR

Ce magnifique résultat ne parut cependant pas probant à Lavoisier. Il l'appuya d'une preuve irrécusable, en reconstituant l'air à l'aide des deux gaz qu'il venait d'isoler. En les mélangeant dans la proportion indiquée par son analyse, il obtint un fluide possédant toutes les propriétés de l'air ; il estima que cette synthèse ne laissait plus de doute : l'air était bien constitué par de l'azote et de l'oxygène, corps indécomposables par la

chaleur et les métaux, et par conséquent plus simples que l'air résultant de leur mélange. Non seulement il effaçait ainsi de la science un des éléments que l'antiquité y avait inscrits, mais encore il inaugurerait les méthodes fondamentales qui devaient, dans l'avenir, permettre d'établir la composition de tous les corps. Il



LABORATOIRE DE LAVOISIER. EXPÉRIENCE SUR LA RESPIRATION DE L'HOMME
(D'après un dessin de M^{me} Lavoisier).

allait bientôt, par l'application de ces méthodes, analyse et synthèse chimiques, fixer la constitution de l'eau, et dédoubler cet élément des anciens.

ÉTUDE DE L'EAU Dès 1770, Lavoisier avait détruit la croyance à la transformation de l'eau en terre en montrant que la distillation ne laisse pas toujours un résidu fixe, comme l'avait affirmé Van Helmont (Belge). L'eau ne possédait donc pas de squelette minéral ; le préjugé déjà détruit pour le charbon l'était désormais aussi pour l'eau. De plus on savait depuis Paracelse que le fer au contact

des acides dégage un air inflammable qui fut ensuite isolé par Scheele en 1768, puis par l'Anglais Cavendish. Macquer ayant constaté en 1776 que la combustion de ce gaz produisait de l'eau, Lavoisier, qui croyait à la production d'un acide, entreprit, avec Bucquet en 1777, puis avec Gingembre en 1781, une série d'essais qui confirmèrent l'observation de Macquer. Il fit alors construire les gazomètres qui, en 1783, lui permirent, avec la collaboration de Laplace, de recueillir une quantité d'eau suffisante pour constater « qu'elle était aussi pure que l'eau distillée et telle que par tous les réactifs connus on ne peut y découvrir le moindre indice de mélange » ; il put alors affirmer que « l'eau n'est point une substance simple, mais un composé d'air inflammable et d'air vital ».

A la même époque, d'autres savants étudiaient la nature de l'eau : Watt, Monge, Cavendish étaient parmi les plus illustres. Ce dernier, qui avait pesé et étudié l'hydrogène, avait aussi constaté la formation de l'eau dans la combustion de l'air inflammable ; mais, partisan du phlogistique, il ne pouvait déduire de cette hypothèse flottante une explication irréprochable du phénomène. La revivification des chaux métalliques, indiquée par Priestley et que Blagden (Anglais) opposait à la théorie de Lavoisier, donna lieu à cette tranchante réponse du savant français : « Le phlogistique n'entre pas en cause. Quand on chauffe du minium dans l'hydrogène, il se forme de l'eau et du plomb ; c'est tout. »

Si à la suite de toutes ces expériences l'eau cessait d'apparaître comme un élément, sa composition définitive n'était pas établie, car personne n'avait pu peser le liquide résultant de la combinaison des gaz. « Il fallait multiplier les preuves, et, après avoir composé artificiellement de l'eau, il fallait la décomposer. » Lavoisier rendit compte dès 1783 de ses premiers essais dans cette voie. Ils aboutirent à la célèbre analyse de l'eau par le fer chauffé au rouge, faite avec la collaboration de Meusnier, et dont les opérateurs conclurent que l'eau était constituée par une partie d'hydrogène unie à sept parties d'oxygène, résultat remarquable, étant donnée l'incertitude qui régnait alors sur la densité des gaz. L'air inflammable prenait le nom définitif d'hydrogène (générateur de l'eau). Ainsi s'effondrait encore un autre élément de la doctrine d'Aristote ; cette doctrine si vénérée du philosophe grec faisait place à une nouvelle conception des corps simples, dont le couronnement devait être la première classification des corps minéraux, résultat vraiment capital.

C **LASSIFICATION** La terre, l'air, l'eau et le feu cédaient la place aux
MINÉRALE éléments nouveaux ou corps simples, qui n'étaient autres
 que les métaux retirés des oxydes (les métaux déphlogistiqués des alchi-

mistes), auxquels s'ajoutaient l'azote, le carbone, le soufre, l'hydrogène, le phosphore, etc., qui, pas plus que les métaux, ne pouvaient être dédoublés en d'autres matières. Ces éléments non métalliques, désignés plus tard sous le nom de *métalloïdes*, se distinguaient des métaux en ce que leur combinaison avec l'oxygène ne fournissait plus des terres basiques, mais plutôt des acides. De fait, dès 1777, Lavoisier avait établi que la combustion du phosphore dans l'oxygène donne l'acide phosphorique, et avait déterminé l'augmentation de poids résultant de cette union. Poursuivant dans cette voie, il montra que la composition de l'acide sulfurique différait de celle du gaz sulfureux par addition d'une quantité supplémentaire d'oxygène, et que des réactions de suroxydation analogues existaient entre l'oxyde d'azote et l'acide nitrique. Ces résultats le conduisirent à appeler *oxygène* ce gaz générateur des acides. Toutefois la formation des sels, si facile à comprendre quand on unit les acides aux chaux métalliques délayées dans l'eau, présentait une grande difficulté quand on envisageait les sels obtenus par la réaction d'un acide sur un métal. Celle-ci donne lieu, en effet, à un dégagement d'hydrogène, qu'on négligeait ou qu'on passait sous silence. Lavoisier, se basant sur la composition de l'eau déterminée par ses expériences, supposa que cet hydrogène provenait de la décomposition de l'eau contenue dans l'acide et dont l'oxygène se fixait sur le métal pour constituer la terre ou oxyde indispensable à la formation du sel, tandis que l'hydrogène se dégageait. Ainsi s'éclaircissaient toutes les particularités de la formation des sels : ce n'est pas le zinc, mais son oxyde qui s'unit à l'acide sulfurique ou au vinaigre. Dans le cas du cuivre et de l'acide nitrique, la formation de l'oxyde est due à une portion de l'oxygène de l'acide, celui-ci se trouvant réduit à l'état de vapeur rutilante moins riche en oxygène.

Toutes ces expériences conduisaient naturellement à une classification des minéraux, car elles se reliaient par la définition des sels donnée par Rouelle l'aîné, le maître de Lavoisier, et qui semble lui avoir sans cesse servi de guide : « Un sel est formé par l'union de quelque acide que ce soit, minéral ou végétal, avec un alcali fixe ou volatil, une terre absorbante, une substance métallique ou une huile. »

Les nombreux éléments, métaux et métalloïdes, admis par Lavoisier, constituaient le fondement de toutes les espèces matérielles, puisque celles-ci résultaient de l'union de ces éléments, un à un ou un à deux ; mais parmi ces espèces, les plus importantes étaient :

- 1^o *Les bases*, résultant de l'union des métaux avec l'oxygène ;
- 2^o *Les acides*, résultant de l'union des métalloïdes avec l'oxygène ;
- 3^o *Les sels*, résultant de l'union des bases avec les acides.

Or, la plupart des minéraux appartenant à l'une de ces catégories trouvent naturellement leur place dans cette classification.

NOMENCLATURE Elle fournit alors un canevas tout à fait approprié à la nomenclature chimique. Admettant qu'une science est une langue bien faite, Guyton de Morveau, avocat général au Parlement de Dijon, épris de chimie et de minéralogie, avait eu l'idée de remplacer les mots innombrables et fatigants en usage dans les sciences, par un vocabulaire plus rationnel, en rapport avec la composition des corps, vocabulaire qu'il proposa dès 1782, et qui fut adopté en 1787 sur le rapport de Berthollet, Fourcroy, Guyton de Morveau et Lavoisier. Les corps simples conservaient leur nom usuel ; les oxydes se caractérisaient par la désignation du métal : oxyde de fer, oxyde d'argent ; les acides tiraient leur nom de celui du métalloïde ; on ajoutait la terminaison *eux* ou *ique* suivant le degré d'oxydation : acide sulfureux, acide sulfurique. Enfin *eux* se changeait en *ite* et *ique* en *ate* dans la nomenclature des sels : sulfite et sulfate de plomb, azotite et azotate de potassium.

NOTATION CHIMIQUE Pour compléter l'œuvre, il ne restait plus qu'à trouver la notation, c'est-à-dire l'écriture symbolique en rapport avec cette langue nouvelle. Proposée par Hassenfratz et Adet en la même année 1787, elle devait prendre, sous l'impulsion de l'Anglais Dalton, une forme suggestive qui allait lui donner une importance insoupçonnée, sur laquelle nous reviendrons.

Tel est l'empire des idées reçues, qu'à Lavoisier, l'un des plus lumineux génies de l'humanité, il fallut dix ans d'efforts pour rallier des adhérents à ses vues ; puis, à mesure que les écailles tombaient des yeux, on « déterrât pour le chagriner, dit Cuvier, tous les vieux livres où pouvaient se trouver quelques idées analogues aux siennes ». Et Lavoisier, après avoir donné l'exemple de la patience nécessaire à tout novateur, donna encore, par sa réserve, une grande leçon de modestie.

En France, ce fut l'adhésion de Berthollet qui détermina, en 1787, le succès définitif. A l'étranger, pour ne citer que les maîtres, je rappellerai que, si l'illustre Black adopta le premier le système de Lavoisier et s'il fut suivi en 1792 par l'Irlandais Kirwan et l'Allemand Klaproth, le Suédois Scheele et Cavendish restèrent attachés jusqu'à leur mort à la doctrine du phlogistique ; et Priestley ne voulut jamais s'incliner devant les idées nouvelles, que, cependant, en 1796, il jugeait de la façon suivante : « La préférence donnée à ce qu'on appelle le nouveau système de chimie sur la doctrine de Stahl, regardée longtemps comme la plus grande décou-

verte que l'on ait jamais faite en chimie, a produit une de ces révolutions dont il y a peu d'exemples dans l'histoire des sciences, si même on en trouve de semblables... Il n'existait rien qui pût servir de base à un autre système avant les travaux de M. Lavoisier. »

Si maintenant on rapproche de cette appréciation l'hommage rendu à Priestley par Lavoisier, en 1774 : « Il n'est peut-être aucune de ces expériences dont M. Priestley ne puisse réclamer la première idée », il deviendra difficile de séparer ces deux grands hommes, si différents par leur œuvre et leur caractère, mais sacrés tous deux par l'ingratitude de leurs concitoyens, et on tirera de leur exemple ce haut enseignement : quand deux hommes de talent traitent d'un même sujet et sur un point obtiennent le même résultat, il importe moins de savoir qui des deux a le premier atteint ce résultat, que de considérer l'élan donné à la science par leurs travaux et leur tournure d'esprit.

Peut-être Lavoisier payait-il de sa vie son écrasante supériorité ; il ne se trouva que Borda et Haüy pour protester contre sa condamnation par le tribunal révolutionnaire au moment même où il fallait, pour sauver la France, indubitablement autant de salpêtre que d'audace. Car, sans cette matière, sans poudre par conséquent, qu'auraient pu, malgré leur patriotisme, les douze armées mobilisées par la Convention ! Ce furent les élèves et les collaborateurs de Lavoisier qui ont pourvu à ce besoin vital. En 1914-18, ce fut encore la chimie qui, nous le verrons, assura notre armement.

Lavoisier a changé l'orientation de la chimie. Après lui, les considérations de poids devinrent prépondérantes dans toutes les questions chimiques et dans tous les pays ; on vit alors se multiplier les recherches systématiques des éléments nouveaux prévus par la théorie, et l'ère des grandes applications s'ouvrir avec Le Blanc et Berthollet. Bref, la chimie prit cet incroyable essor dont personne aujourd'hui ne peut fixer les limites mais dont nous allons préciser le point de départ. Guidé par la classification de Lavoisier, Berthollet allait en outre donner une première idée des règles rationnelles qui président aux transformations matérielles, en montrant que la stabilité d'un corps dépend de ses propriétés physiques, et surtout de la volatilité dans les réactions par voie sèche, et de l'insolubilité dans les réactions par voie humide. Nous retrouverons les idées de ce grand chimiste à l'origine de la *Mécanique chimique*, et nous montrerons le développement qu'elles ont pris à la suite des découvertes de Deville et de Berthelot.

III

IMPULSION SCIENTIFIQUE

R ECHERCHES D'ÉLÉMENTS
NOUVEAUX

Si le système de Lavoisier mettait désormais au premier plan les questions pondérales et la recherche de nouveaux éléments clairement définis, il ne pouvait cependant être ni parfait ni complet. Sur la nomenclature qui en résultait allaient bientôt se greffer d'autres idées directrices : une modification de la conception des acides et des sels, puis une notation suggestive résultant de la notion des atomes pesants de Dalton, féconde image des lois pondérales. Examinons ces deux apports nouveaux.

L ES HYDRACIDES ET LA
THÉORIE UNITAIRE

L'oxygène, qui entrait à la fois dans la constitution des bases et dans celle des acides, ne pouvait être la cause exclusive de l'acidité. Du vivant de Lavoisier, Berthollet l'avait remarqué, et il avait corrigé ce qu'avait d'excessif l'exclusivisme du mot oxygène. Il avait fait mieux encore en établissant, par ses analyses, en 1789, que l'acide cyanhydrique ne renfermait point d'oxygène, puisqu'il était uniquement constitué de carbone, d'azote et d'hydrogène. Il n'en resta pas là. Dix ans plus tard, vérifiant la composition du gaz sulfhydrique indiquée par Scheele, il conclut « que ce corps ne contient pas d'oxygène, bien qu'il ne s'éloigne cependant pas de l'acide carbonique par ses propriétés acides ». Enfin, on lit dans sa *Statique chimique* de 1803 : « Prétendre que toute acidité, même celle des acides fluorhydrique et muriatique, provient de l'oxygène, c'est reculer trop loin les limites de l'analogie. » Dans ces conditions, il paraît difficile de considérer l'Anglais Davy comme l'auteur incontestable de la découverte des acides hydrogénés, puisqu'en 1787 il avait à peine dix ans. Ce qu'on ne peut pas refuser à Davy, c'est le très grand mérite d'avoir étendu cette idée et de l'avoir rattachée à ses expériences électrolytiques.

C'est au moyen de la pile de Volta qu'en 1806 Davy fit ses travaux sur la décomposition des sels, travaux à la suite desquels il envisagea l'hydrogène comme le véritable générateur des acides. Ayant d'abord montré que les oxydes métalloïdiques de Lavoisier ne deviennent en réalité acides qu'au contact de l'eau, il faisait rentrer tous les acides dans un même cadre, qui était en rapport étroit avec l'électrolyse des sels telle qu'il la concevait.

Au lieu de résulter de l'union d'un oxyde acide avec une base, les sels provenaient du remplacement de l'hydrogène acide par un métal : l'acide devenait un sel d'hydrogène :

Acide nitrique.....	$\text{NO}^3.\text{H}$	Acide chlorhydrique...	$\text{Cl}.\text{H}$
Nitrate de potassium...	$\text{NO}^3.\text{K}$	Chlorure de sodium...	$\text{Cl}.\text{Na}$
Nitrate d'argent.....	$\text{NO}^3.\text{Ag}$	Chlorure d'argent.	$\text{Cl}.\text{Ag}$

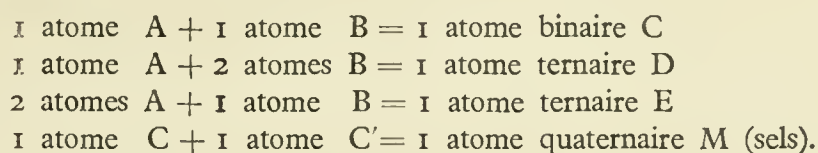
Cette conception *unitaire*, opposée à la théorie dualistique des acides et des bases, eut sur le développement de la chimie une influence considérable. Toutefois, si Davy donnait des sels une définition plus générale, il n'effaçait pas les motifs pour lesquels Lavoisier avait attribué le rôle acidifiant à l'oxygène : Gerhardt, par sa découverte des radicaux acides en 1852, fit revivre ce caractère.

L OIS PONDÉRALES L'importance des poids eut une action prépondérante sur la *notation chimique*. Proust d'abord, dans ses contestations avec Berthollet, énonça la *loi des proportions définies* : deux corps qui se combinent pour en former un troisième s'unissent toujours dans le même rapport pondéral. La signification de cet énoncé est la suivante : un corps possède souvent plusieurs origines. Par exemple, les coquilles des œufs, le marbre, le spath d'Islande et le carbonate précipité caractérisé par Black sont des variétés d'une même espèce. Leur composition est la même en dépit de leur origine ou de leur mode de formation.

Sans doute on savait avant Proust préparer des corps et effectuer des analyses. C'était à Paris, chez Cadet ou chez Baumé, que Priestley se procurait les produits les mieux appropriés à ses expériences. A l'hôtel des Monnaies, les praticiens contrôlaient déjà, par pesées de la lune cornée (chlorure d'argent), le titre des alliages d'argent. La loi de Proust était une codification nécessaire des notions analytiques alors éparses ; elle arrivait à son heure au moment où, dans un travail qui est devenu le fondement de la *mécanique chimique*, Berthollet mettait en discussion la stabilité et la fixité d'un sel en présence d'autres corps, alors que les études des Allemands Wenzel et Richter sur les proportions chimiques n'avaient pas encore été propagées par le Suédois Berzélius.

A T O M E S D E D A L T O N La notion atomique, introduite en chimie par Dalton, donna aux éléments de Lavoisier une forme concrète et irréductible : l'atome. Il ne s'agissait pas des atomes de Démocrite, les mêmes pour tous les corps ; chaque élément au contraire avait sa particule propre caractérisée

par un poids invariable, les agents chimiques ne pouvant ni créer ni détruire ces corpuscules atomiques : « Il serait aussi difficile, dit Dalton, d'introduire dans le monde ou d'annihiler une planète que de créer ou de détruire une particule d'hydrogène. » Par contre, plusieurs atomes différents se soudent soit un à un, soit un à deux, soit un à trois, pour former les composés naturels que l'analyse et la synthèse permettent de décomposer et de recomposer. Ainsi les faits étaient représentés de la façon simple et tangible suivante :



Dalton admettait en outre qu'à l'état gazeux les atomes sont séparés par de grands espaces et se trouvent en nombre déterminé dans un volume gazeux donné, d'où il concluait qu'un composé binaire doit toujours avoir un poids spécifique plus grand que le simple mélange de ses composants (*New system of chemical philosophy*, 1808). Donnant donc à chaque atome un symbole particulier qui n'a plus rien de cabalistique, et invoquant la raison de simplicité pour donner la forme binaire à tout composé exclusivement formé par deux éléments, il conçoit la possibilité de trouver le poids relatif de chaque élément par rapport à l'hydrogène. Il considère, par exemple, l'eau, l'ammoniaque et l'oxyde nitreux le moins riche en oxygène, comme des atomes composés (molécules) binaires, et il représente ces corps par les symboles suivants, origine de la notation chimique actuelle. Celle-ci ne diffère des signes adoptés par Dalton que par leur remplacement par des lettres, conformément à la simplification apportée par Berzélius.

	HYDROGÈNE	AZOTE	OXYGÈNE	CARBONE	SOUFRE	MERCURE
Symboles de Dalton.....	○ = 1	⊕ = 5	⊙ = 7	● = 5	⊗ = 13	⊗ = 167
Symboles de Berzélius...	H	N ou Az	O	C	S	Hg
Formation d'eau.....	○ + ⊙ = ○⊙ (Dalton)			H + O = HO (Berzélius).		
Formation d'ammoniaque....	○ + ⊕ = ○⊕ (—)			H + N = HN (—).		
Formation d'acide carbonique.	⊙ + ● + ⊙ = ●⊙⊙ (—)			2O + C = CO ² (—),		

alors que l'oxyde de carbone prend la forme ●⊙. De même, en rapportant avec Dalton la teneur en oxygène de chaque oxyde d'azote à un poids fixe d'azote, ces composés semblent se combiner à 1. 2. 3... atomes d'oxygène ⊙ et donner les formes atomiques : ⊕⊙ ⊕⊙⊙ ⊕⊙⊙⊙... En réalité l'analyse chimique prouve que, dans ces oxydes, ce n'est plus un poids ⊕ = 5, mais un poids 14 d'azote qui se combine à

1. 2. 3 atomes \odot d'oxygène. Ainsi le poids atomique 5, admis par Dalton pour donner à l'ammoniaque, seul composé hydrogené de l'azote, la forme la plus simple $\odot\odot$, ne concorde pas avec la valeur déduite du plus simple des oxydes d'azote (NO). L'interprétation des lois de Gay-Lussac par l'Italien Avogadro et par Ampère allait corriger ce défaut de l'œuvre de Dalton que son illustre compatriote Davy avait couverte de sa grande autorité.

L OIS DE GAY-LUSSAC En chimie la raison de simplicité invoquée par Dalton n'a pas l'importance qu'elle possède en astronomie. Elle conduit au système des équivalents chimiques, et non pas au système atomique tel qu'il résulte de l'étude des gaz. Gay-Lussac et l'Allemand Humboldt avaient remarqué dès 1805 que les volumes des gaz générateurs de l'eau sont en rapports simples. Ces recherches, poursuivies ensuite par Gay-Lussac seul, conduisirent à généraliser ce fait et à énoncer en 1808 les lois suivantes : les volumes de deux gaz qui se combinent sont en rapport simple 1^o entre eux, 2^o avec le volume du composé.

Gay-Lussac avait aussi constaté, à l'instigation de Laplace, que le coefficient de dilatation était le même pour tous les gaz. De cette observation, jointe à la loi de Boyle-Mariotte, on conclut aujourd'hui que ces lois s'appliquent avec une rigueur suffisante aux gaz dilués et aux états correspondants de Van der Waals. Les volumes gazeux répondant à des poids déterminés, les lois de Gay-Lussac se ramènent à des considérations pondérales ; elles confirment et précisent les vues de Dalton, qui cependant ne voulut jamais en tenir compte. Il les trouvait en désaccord avec les principes qu'il avait admis, particulièrement avec l'idée que la combinaison de deux atomes simples devait se faire avec contraction de volume, ce qui n'arrivait pas entre le chlore et l'hydrogène.

Gay-Lussac, de son côté, s'en tenait à ses observations indépendamment de toute interprétation hypothétique, quand, en 1811, parut dans le *Journal de M. de Laméthrie* un essai « sur une manière de déterminer les masses relatives des molécules élémentaires des corps, et les proportions suivant lesquelles elles se combinent ». L'auteur que ces considérations devaient illustrer, l'Italien Avogadro, s'appuyait sur les lois de Gay-Lussac, et supposait en outre que toutes les particules gazeuses occupent le même volume, quelle que soit leur nature ; il concluait que le nombre de ces molécules intégrantes (molécules) est toujours le même à l'état gazeux dans l'unité de volume, d'où résulte une relation constante entre la densité gazeuse et le poids de la molécule. Bien qu'Avogadro ait indiqué la distinction qu'il faut faire entre les molécules intégrantes (molécules) et les molécules

élémentaires (atomes), il convient de faire une remarque. La plupart des corps alors connus n'étaient pas susceptibles d'être amenés à l'état gazeux ; c'étaient les métaux, les oxydes, les sels. Cette question préoccupait Berzélius, dont l'autorité était incontestée. La vogue de l'atome fut sans doute la principale cause de l'oubli des conclusions d'Avogadro quand furent formulées celles d'Ampère, résumées dans une lettre écrite à Berthollet en 1814 : « Vous savez que l'importante découverte de M. Gay-Lussac m'a fait naître l'idée d'une théorie qui explique tous les faits découverts par cet habile chimiste. Les particules de tous les gaz simples ou composés sont placées à la même distance les unes des autres. Le nombre des particules est alors proportionnel au volume des gaz. Celle de l'eau sera composée d'une particule entière d'hydrogène et de la moitié d'une particule d'oxygène... » La notion d'atome indivisible était contredite par la considération même de ces demi-particules ; et Ampère, pour expliquer la cristallisation des corps solides, admettait que la molécule devait contenir au moins quatre atomes.

De son côté, Berzélius obtenait par d'autres moyens la détermination des poids atomiques des éléments. Agençant à la fois la théorie dualistique de Lavoisier, l'hypothèse atomique et les résultats électrolytiques de Davy, Berzélius admettait que dans l'union de deux éléments les atomes électrisés de sens contraire se juxtaposent en se neutralisant chimiquement et électriquement, pourvu que leur mobilité soit suffisante. Il expliquait à la fois les phénomènes thermiques et le vieil adage : *corpora non agunt nisi soluta*. De même, pour le savant suédois, un sel se formait par la combinaison d'une base métallique chargée positivement avec un acide chargé négativement,



GAY-LUSSAC (1778-1850)
(D'après un dessin de Belliard).

ces deux groupes pouvant être séparés par le courant et régénérer les constituants définis par Lavoisier, mais non pas les éléments : métal, oxygène et métalloïde. Les sels doubles eux-mêmes, tels que l'alun, sont formés de sulfate d'alumine négatif et de sulfate de potasse positif.

Pour exprimer ces résultats par les formules atomiques dont il avait admis le principe, Berzélius dut trouver l'expression exacte de la valeur des atomes métalliques. Ses analyses rapportées à un poids fixe X de métal, conformément aux idées de Dalton, lui donnaient l'expression XO , XO^2 , XO^3 , X^2O^3 des divers composés oxygénés engendrés par cet élément. Au lieu de choisir X dans le plus simple XO , il subordonna la condition de simplicité à des considérations d'analogie qui doubleraient la valeur de la notion atomique, en se basant sur l'isomorphisme et sur les chaleurs spécifiques des atomes.

A **NALOGIES CHIMIQUES :** Mistcherlich, élève de Berzélius, ayant constaté **ISOMORPHISME** l'identité des formes cristallines des phosphates et des arsénates naturels, s'aperçut que des poids d'acide phosphorique et d'acide arsénique contenant la même quantité d'oxygène s'unissent tous deux au même poids de chaux. Ces composés ont alors même constitution, puisque à un même poids de base sont unis cinq atomes d'oxygène et un atome de métalloïde. Mistcherlich, ayant lié l'isomorphisme à cette identité de composition, étendit ses constatations à d'autres exemples. Les objections de Beudant et de Haüy l'obligèrent, il est vrai, à restreindre la portée de cette observation ; mais Berzélius, considérant comme acquis qu'il faut attribuer la même formule à deux corps isomorphes, tira de cette loi, il faut le reconnaître, de très heureux résultats.

C **HALEUR SPÉCIFIQUE : LOI** Quelques mois auparavant, dans la même **DE DULONG ET PETIT** année 1819, Dulong et Petit, utilisant les poids atomiques publiés en 1816 dans le traité de Berzélius pour comparer les chaleurs spécifiques des métaux qu'ils venaient de déterminer, remarquèrent que, pour un certain nombre d'éléments, le produit de la chaleur spécifique par le poids atomique est constant, et par suite que la chaleur spécifique atomique est elle-même constante (voisine de 6,3) pour un corps à l'état solide. Ce résultat, d'abord contesté par Regnault, finit par être admis par l'illustre physicien, au moins comme loi approchée. De sorte que le poids atomique d'un corps apparaissait comme une quantité susceptible de grouper un ensemble de propriétés importantes. Dès lors, ce fut la question d'analogie, et non celle de simplicité, qui pré-

valut dans le choix du poids atomique. Comme toute idée juste, cette considération devint féconde. Rappelons qu'elle conduisit Peligot à la découverte de l'uranium, par cette observation que l'oxyde de ce métal, se comportant comme un corps simple et considéré comme tel, ne répondait pas à la loi de Dulong et Petit. Beaucoup plus tard, Cannizaro fit adopter les poids atomiques actuellement admis pour les métaux, en s'appuyant sur leur chaleur spécifique. Ces notions, en dépit de leur imprécision et de leur état embryonnaire, ont rendu les plus grands services. Si, dans le choix d'un poids atomique, on hésite entre un nombre et ses multiples, elles suppriment toute indécision.

IV

ACTION DES IDÉES DE LAVOISIER SUR L'INDUSTRIE

DÉCOUVERTES Après avoir suivi l'évolution des théories chimiques, examinons les découvertes et les applications innombrables qu'elles ont suscitées en chimie minérale. La recherche de nouveaux éléments indestructibles, métaux et métalloïdes, apparut d'abord aux savants de tous les pays comme le but essentiel. Dès 1789, Klaproth découvrit l'urane et la zirconie ; l'Anglais Crawford, la strontiane en 1790 ; un autre Anglais, Grégor, le titane en 1791. En France, Vauquelin isola le chrome (1797) et la glucine (1798). L'imperfection des moyens de chauffage dont il disposait ne lui permit d'extraire le chrome du plomb rouge de Sibérie qu'à l'état pulvérulent, dont l'aspect terne ne faisait point soupçonner l'élément compact, dur et éclatant, que Moissan devait préparer au four électrique cent ans plus tard. L'aluminium même, obtenu par l'Allemand Wœhler en 1827, n'avait rien du métal que Deville nous a fait connaître en 1859. Au début du dix-neuvième siècle, l'Anglais Hatchett obtint le tantale (1801) ; puis Tennant, Collet-Dessotil et Wollaston (Anglais) trouvèrent l'iridium, l'osmium, le palladium, le rhodium dans la mine du platine ; Berzélius isola le cérium, etc. La découverte des métaux alcalins, en 1807, eut le plus grand retentissement dans le monde savant. Elle marquait la puissante intervention en chimie d'un nouvel agent impondérable : l'électricité, et confirmait à trente ans de distance les prévisions de Lavoisier. Aussi, en pleine période de Blocus continental, elle valut à Davy, son auteur, le grand prix de l'Institut de France, fondé par Napoléon pour

développer les découvertes voltaïques. En dépit de la nouvelle théorie, la potasse était encore considérée comme un corps simple, quoiqu'elle se salifiât par les acides sans dégager d'hydrogène, à la manière des terres basiques, lorsque Davy, par l'action d'une forte pile de Volta, en retira le métal prévu. Ce travail servit de prélude à l'extraction par la pile des métaux alcalinoterreux : le calcium, le baryum, le strontium et le magnésium. La *lithine*, que le Suédois Arfvedson venait de retirer du lépidolithe de Saxe et qu'il avait considérée comme l'alcali des minéraux, d'où le nom de *lithine*, devait être aussi un oxyde métallique. De fait, par électrolyse, Davy en retira le lithium ; mais ce fut Guntz qui, quatre-vingts ans plus tard, fit connaître l'action si curieuse de ce métal sur l'azote et sur l'hydrogène, après l'avoir obtenu abondamment par électrolyse de son chlorure.

Le dégagement d'hydrogène qui, dans la décomposition électrique de la potasse, accompagnait toujours la mise en liberté du potassium, provoqua de la part de Guy-Lussac et de Thénard cette objection que l'action de la pile pouvait produire un hydrure ; aussi ces deux chimistes français imaginèrent-ils le mode de préparation chimique des métaux alcalins basé sur la décomposition des alcalis par le fer chauffé au rouge. Ce procédé confirma les expériences de Davy, puis, en 1808, il fut mis à profit par ces deux savants pour tirer le bore de l'acide borique. Indécomposable par le charbon dans les foyers de cette époque, cet acide, pour les disciples de Lavoisier, renfermait un métalloïde uni à l'oxygène, tandis que, pour les autres chimistes, il était un corps simple. Le potassium, réagissant sur l'oxygène avec plus d'énergie que le charbon, parut tout indiqué pour le réduire. L'expérience confirma la justesse de cette déduction. Quelques mois plus tard, Davy, soumettant un mélange d'acide borique et de charbon à la température intense de l'arc électrique, réussit aussi de son côté à opérer cette séparation. Ainsi disparaissait un des derniers remparts opposés au système de Lavoisier. Encore fallut-il attendre la sanction des expériences de Wöhler (Allemand) et Deville qui obtinrent du bore en quantité suffisante pour en fixer les principales propriétés et son action sur l'azote. Quant à la silice, elle fut également réduite par les mêmes moyens. Ce fut Berzélius qui, en 1823, fit connaître les propriétés essentielles du silicium, confirmées par Wöhler. Enfin, par l'emploi du four électrique, Moissan a clos l'étude de ces métalloïdes au début du vingtième siècle. Le rôle du sodium dans les précédentes opérations avait remis en usage la décomposition de son carbonate par le charbon. Ce procédé, indiqué par Curaudau en 1808, perfectionné par le Suisse Brunner (né en 1796), fut mis au point par Deville pour l'obtention de l'aluminium.

La nature élémentaire du chlore avait, comme nous l'avons vu, été soupçonnée

par Berthollet et confirmée par Gay-Lussac et Thénard, qui basaient leur opinion sur ce que le charbon ne lui enlève pas d'oxygène au rouge blanc, comme il arriverait si le chlore résultait de l'oxydation de l'acide muriatique. Davy formula la même conclusion après avoir observé l'identité du sel obtenu par le contact du potassium soit avec le chlore, soit avec le gaz chlorhydrique, qui dégage de l'hydrogène, comme tout autre acide. La nature élémentaire du chlore ne laissait plus de doute. Elle allait être sanctionnée par deux découvertes françaises. D'abord celle de l'iode, en 1811, due à Courtois, salpêtrier de Paris. Cet industriel avait procuré à la fois à Davy et à Gay-Lussac des échantillons d'iode en leur indiquant les expériences qu'il avait déjà réalisées. Ces illustres chimistes, poursuivant indépendamment leurs recherches, arrivèrent simultanément à la même conclusion, Gay-Lussac par des méthodes essentiellement chimiques, Davy par sa méthode électrique : l'iode était un corps simple, dont les propriétés étaient parallèles à celles du chlore. Puis, en 1826, Balard trouva le brome et mit en lumière son étroite parenté avec le chlore et l'iode. Manifestement, les trois corps constituaient une famille à laquelle Berthollet avait adjoint le fluor, bien que cet élément n'ait été isolé qu'en 1881 par Moissan. Le relief donné par Balard à cette famille métalloïdique en faisait un modèle qui, aussitôt généralisé, prit sur le développement de la chimie une influence décisive.



THÉNARD (1777-1857)

(D'après un dessin de Belliard. Lithographie de Delpech).

ANALYSE SPECTRALE

La découverte de l'analyse spectrale, exposée dans l'histoire de la physique, est liée à la découverte du rubidium et du césium. Cet événement retentissant rejaillit sur l'œuvre de Lavoisier et en étendit

la portée. Les éléments volatilisés par une flamme la colorent parfois ; mais leur lumière analysée par un prisme et observée à travers une fente étroite, est toujours parsemée de raies brillantes qui sont l'image de la fente. La couleur et la position de ces raies dans le spectre caractérisent l'élément. Ce moyen subtil d'investigation, appliqué au résidu solide des eaux minérales de Durkheim, permit aux Allemands Bunsen et Kirchhoff d'isoler et de caractériser le rubidium et le césium en 1861. Employé par Crookes à l'analyse des boues des chambres de plomb, ce procédé révéla l'existence d'une raie verte inconnue, répondant à un nouveau métal, le thallium, séparé par Lamy. Successivement perfectionnée en France par Lecoq de Boisbaudran, par Demarçay et par M. Urbain, la technique spectroscopique conduisit à la découverte du gallium en 1875, à celle du gadolinium par Marignac en 1878, à l'extraction des éléments constitutifs des terres rares ou monazites, à celles des nouveaux éléments de l'air par l'Anglais Ramsay, enfin à la caractérisation des éléments radioactifs.

Aujourd'hui, par la considération des *raies ultimes* due à M. de Gramont, la spectroscopie a pénétré dans l'analyse quantitative, puisque l'ordre de disparition d'un élément est proportionnel à la quantité de cet élément contenue dans le corps analysé. Ainsi la mesure du temps remplace les opérations les plus ardues.

Alors que les innombrables expériences des alchimistes avaient à peine fourni une vingtaine de terres, dont ils méconnaissaient d'ailleurs la composition, la chimie de Lavoisier, dotée de ses méthodes, faisait connaître en moins d'un siècle quatre-vingts éléments nouveaux, préluant dans l'intervalle à l'analyse spectrale, à la classification de Mendéléïeff, dont la découverte du gallium démontra l'importance. Telle est la solidité de l'édifice, que même la désintégration atomique, à laquelle on semble aboutir aujourd'hui, n'effacerait pas la notion d'éléments dont le fondateur de la chimie s'est d'ailleurs gardé d'affirmer la stabilité absolue.

IMPULSION **INDUSTRIELLE** Le prodigieux développement de l'industrie chimique qui suivit l'avènement des idées de Lavoisier est frappant. L'empirisme fait progressivement place à la méthode, la fantaisie à l'observation du fait positif ; le réalisme prend le rôle prépondérant. C'est au point de vue de leur utilisation dans les alliages que Darcet et Sérullaz étudient les métaux, et, dès 1795, Le Blanc inaugure la grande industrie chimique par son procédé d'obtention de la soude artificielle, qui développa la fabrication de l'acide sulfurique, celles du verre et du savon, et donna naissance à l'industrie du chlore

Énoncé dans le nouveau langage, le problème étudié par Le Blanc est clair, et sa solution découle de ses termes précis. Il s'agit de remplacer le carbonate de soude, jusque-là extrait des cendres de varechs, par ses constituants, base et acide, extraits des produits répandus en France.

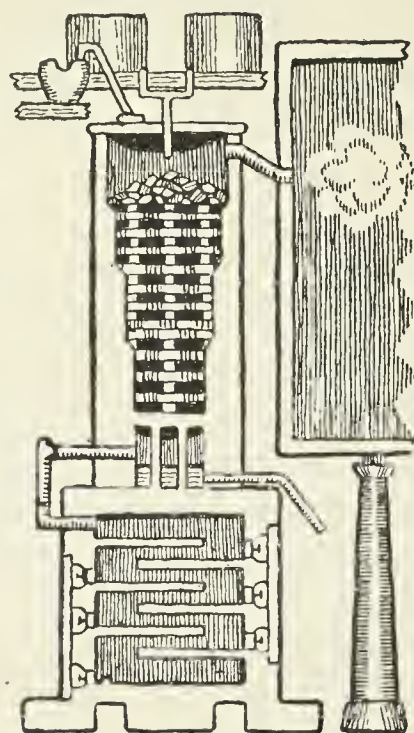
L'idée toute naturelle de transformer le sulfate de soude en carbonate par l'action des pierres calcaires ne donna pas de résultat direct. Une addition de charbon au mélange réduisit le sulfate $\text{Na}^2 \text{SO}^4$ en sulfure $\text{Na}^2 \text{S}$, et provoqua la formation d'un mélange de sulfure de calcium et de carbonate de soude qu'on sépara par lessivages. Aussitôt l'extraction du sel ordinaire doubla d'importance, et la fabrication de l'acide sulfurique, indispensable à sa transformation en sulfate, prit une extension correspondante dont il convient d'exposer le développement.

L'ACIDE SULFURIQUE ET LES INDUSTRIES QUI EN DÉRIVENT Il existe peu d'industries qui ne soient pas tributaires de la fabrication de l'acide sulfurique. Il sert en effet à la préparation de tous les autres acides, à l'absorption de l'ammoniaque, au décapage des métaux, à l'épuration des huiles, aux distilleries agricoles, à l'obtention des sulfates de fer et de cuivre indispensables à la lutte contre les maladies parasitaires qui ravagent nos vignobles, mais surtout à la fabrication des superphosphates et des poudres de guerre. En voici les principes :

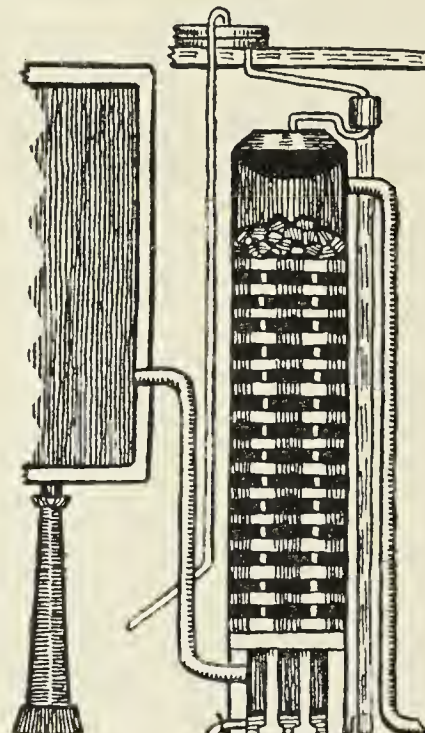
Le soufre en brûlant donne le gaz sulfureux	$\text{S} + 2 \text{O} \longrightarrow \text{SO}^2$
Qui par suroxydation donne le composé sulfurique . .	$\text{SO}^2 + \text{O} \longrightarrow \text{SO}^3$
Celui-ci, au contact de l'eau, fournit l'acide sulfurique	$\text{SO}^3 + \text{H}^2\text{O} \longrightarrow \text{SO}^4\text{H}^2$

Au début du dix-septième siècle, on préparait l'acide vitriolique en brûlant du soufre dans l'air humide. En 1666, Nicolas Lémery et Lefèvre firent faire à cette fabrication un grand pas : ils brûlaient du soufre mélangé de salpêtre dans une cuiller en fer au milieu d'un ballon de verre contenant de l'air chargé de vapeur d'eau. Ce procédé, réalisé en Angleterre par Ward, fit tomber le prix du kilogramme d'acide étendu de cent francs à cinq francs soixante-quinze après le remplacement, en 1745, des récipients en verre par une chambre de plomb d'un mètre cube. En 1769, le procédé fut encore modifié par Chartel et les fabricants rouennais, qui imaginèrent de brûler le soufre dans un courant d'air et non dans un récipient de volume limité. Ce mode de fabrication fut perfectionné en 1774 par La Follie, qui injecta de la vapeur d'eau dans les chambres. En 1793, Clément et Desormes, ayant montré le rôle prépondérant de l'air atmosphérique et précisé celui des composés nitreux, les conditions essentielles de la production étaient dès lors fixées, mais la dépense

d'acide nitrique, source des produits nitreux, restait considérable, puisque les gaz chargés de ces produits étaient rejetés dans l'atmosphère après transformation complète du gaz sulfureux. En 1835, Gay-Lussac introduisait à l'usine de Chauny le premier appareil pour leur récupération à la sortie des chambres ; c'est celui qu'on a appelé la tour de Gay-Lussac. Cette invention si remarquable ne se répandit que lentement et péniblement à cause des difficultés qu'entraînait le réemploi de l'acide



LE FOUR PERRET SURMONTÉ
DE LA TOUR DE GLOVER



LA TOUR DE GAY-LUSSAC

sulfurique nitreux sortant des récupérateurs. En 1861, une tour analogue, placée en tête des chambres de plomb par Glover, donna le type actuel de l'appareillage, qui comprend essentiellement : 1^o un ensemble de fours permettant la production de gaz sulfureux ; 2^o une tour de Glover, servant à la fois à l'introduction dans la masse gazeuse des produits nitreux nécessaires à la réaction, à la dénitrification et à la concentration des acides provenant de la tour de Gay-Lussac ; 3^o un système de chambres de plomb, placées en série, où le gaz sulfureux se transforme en acide sulfurique sous l'influence des composés nitreux, de l'oxygène de l'air et d'eau pulvérisée ou vaporisée ; 4^o de deux tours de Gay-Lussac destinées à récupérer les produits nitreux, par arrosage des résidus gazeux avec de l'acide sulfurique de densité 1,70 qui dissout les vapeurs nitreuses, puis est renvoyé au Glover.



COULÉE DE GLACE A L'USINE DE CHANTEREINE
(Compagnie de Saint-Gobain)

Dans ces conditions, le prix de revient, qui dépend surtout de celui du gaz sulfureux, approchait de 2 fr. 50 les cent kilogrammes. On avait d'abord employé exclusivement le soufre de Sicile pour obtenir ce gaz, quand d'Artigues tenta, mais sans succès, d'utiliser les pyrites qui se rencontrent en abondance dans notre sol. En 1850 Michel Perret construisit un four comprenant cinq soles superposées entre lesquelles l'air circule ; la pyrite étalée en couche mince y est grillée complètement sans emploi d'un autre combustible. Le four de Perret est encore en usage dans nombre d'installations. Cependant les difficultés de la main-d'œuvre et les besoins de l'industrie en acide sulfurique augmentant toujours, on construisit, à partir de 1900, des usines géantes comme celles de la Madeleine (Nord) ou de Chauny (Aisne) dont la production dépassait deux cents tonnes d'acide par jour. Les fours à dalles de Perret ont fait place, en France, à ceux de Bracq-Laurent, énormes cylindres en maçonnerie, où toutes les opérations sont assurées mécaniquement. Leurs grandes dimensions diminuent la déperdition de chaleur et permettent un meilleur grillage des pyrites, et même de certaines blendes moins riches en soufre, sans l'addition d'un combustible étranger.

OLÉUM Le procédé des chambres de plomb fournit à bon compte les grandes quantités d'acide nécessaires à la fabrication des engrais et à la plupart des usages industriels. Mais il se prête mal à la production de l'acide concentré nécessaire à la préparation des explosifs, à celle des couleurs organiques et au raffinage du pétrole. L'acide destiné à ces emplois se préparait en Saxe et en Bohême par la calcination du sulfate de fer (acide de Nordhausen). On utilise maintenant des procédés catalytiques.

On savait depuis longtemps combiner au laboratoire le gaz sulfureux à l'oxygène de l'air en présence de la mousse de platine. La réaction exothermique se continue d'elle-même, une fois commencée. Le produit obtenu peut être aussi concentré qu'on le désire, au point d'être constitué par de l'anhydride SO^3 presque pur. En 1833, le célèbre industriel alsacien Kuhlmann entreprit cette fabrication dans son usine de Loos-lès-Lille. Il y renonça après avoir constaté que la mousse de platine perd ses propriétés catalytiques au bout de quelque temps. En 1900, ses travaux furent repris en Allemagne par la Badische Aniline, et l'on reconnut que le platine conserve indéfiniment ses propriétés en l'absence de trois corps particulièrement nocifs : l'arsenic, le phosphore et le mercure. Pour purifier les gaz, on les refroidit lentement, puis on arrête les poussières qu'ils entraînent, en les envoyant dans des tours arrosées d'acide et en les filtrant sur du coke. Alors seulement les gaz traversent le catalyseur

constitué par du sulfate de magnésie recouvert de noir de platine et enfermé dans des caisses en tôle. De l'acide sulfurique étendu absorbe ensuite l'anhydride formé et se concentre rapidement, sous forme d'acide fumant ou *oléum*. Récemment un progrès a été fait aux établissements Kuhlmann, en remplaçant le réchauffeur à foyer par la chaleur de réaction, grâce à un échangeur de température parcouru dans un sens par les gaz allant au catalyseur, et dans l'autre par ceux qui en sortent.

C'est par l'étude de la marche des chambres de plomb que Clément et Désormes ont dévoilé le mécanisme des actions catalytiques. Loin d'être passif, le catalyseur possède une double activité. Ainsi, dans la formation de l'acide sulfurique, les composés nitreux fixent directement l'oxygène ; puis, en présence de l'eau, ils cèdent cet oxygène au gaz sulfureux pour le transformer en acide sulfurique ; de sorte que le dérivé azoteux, régénéré par cette seconde action, recommence indéfiniment le cycle des réactions.

SOUDE ET VERRE Revenons au procédé Le Blanc, ou plutôt à ses conséquences. L'acide sulfurique transforme le sel marin en sulfate de soude et gaz chlorhydrique. Ce sulfate de soude, traité comme il a été dit, par un mélange de craie et de charbon, se change en carbonate, que l'on sépare du résidu calcique sulfuré en le dissolvant dans l'eau. L'évaporation de cette dissolution a procuré pendant près d'un siècle la soude artificielle employée comme matière première par les verriers, les savonniers et les blanchisseurs.

La grande quantité d'acide chlorhydrique dégagée pendant la fabrication du sulfate de soude était un des inconvénients du procédé Le Blanc, à cause de ses effets nuisibles sur la végétation. En 1795, Berthollet conseilla de recueillir ce gaz par dissolution dans l'eau, et de le transformer en chlore, dont il venait de découvrir le pouvoir décolorant. Le gaz chlorhydrique, sous-produit primitivement négligé, devint alors la matière indispensable à de nouvelles industries bientôt florissantes.

Le première réalisation de la conception de Berthollet est due à Labarraque, qui, dans son usine de Javel, prépara les chlorures décolorants en absorbant par les alcalis le chlore extrait du gaz chlorhydrique. La substitution de la chaux aux alcalis de l'eau de Javel aboutit à la production d'une matière désinfectante et décolorante économique, le *chlorure de chaux*, longtemps indispensable à l'hygiène publique, au blanchiment des toiles, à la fabrication du papier. Pour répondre à ces besoins nouveaux, on perfectionna la condensation par l'eau du gaz chlorhydrique en utili-

sant à cet effet des touries remplies d'eau, puis des colonnes à coke imitées de celle de Gay-Lussac. Bientôt l'acide chlorhydrique devenait une matière première importante, dont la découverte du chlorate de potasse par Berthollet doubla les usages ; car ce sel provoqua l'invention des allumettes chimiques, et celle des amorces et des poudres brisantes, utilisées surtout pendant la dernière guerre pour la confection des grenades. Ces applications ont également nécessité des perfectionnements considérables dans la fabrication du chlore. Ils ont été réalisés en Angleterre par le procédé de Weldon, et surtout par celui de Deacon fondé sur la décomposition catalytique du gaz chlorhydrique HCl par l'air.

L'emploi de ces sous-produits, abaissant le prix de revient de la soude, déterminait une prospérité croissante des savonneries, des verreries. De plus, la substitution de la soude à la potasse dans la fabrication du verre s'imposait par le bas prix de la soude. Le remplacement du bois par la houille, qui donnait des températures plus élevées, amena dans cette industrie, immuable depuis si longtemps, une modification devenue possible par la connaissance des lois qui régissent la décomposition des sels, lois que Berthollet venait d'établir. Pelouze parvint à substituer aux carbonates alcalins le sulfate de soude, évitant ainsi la transformation coûteuse de ce sel en carbonate, d'où nouvel abaissement du prix du verre et extension de ses usages. Pelouze utilisait la fixité de la silice SiO_2 pour chasser l'oxyde sulfurique SO_3 , grâce à la surélévation de température produite par la houille. Adapté à la fabrication des glaces de Saint-Gobain, ce perfectionnement paraissait acquis, lorsque la mise au point du procédé Solvay, déterminant un énorme abaissement du prix du carbonate de soude, amena le retour à l'emploi de ce sel, non pas seulement à cause de son moindre équivalent (106 contre 142 pour le sulfate), mais surtout parce qu'avec le carbonate, plus fusible et plus actif, la vitrification se fait plus vite et à plus basse température, de sorte que ce gain de temps et de charbon compensait le prix du sel alcalin, tombé d'ailleurs de trente-six à douze francs. Ce n'est pas seulement par les glaces de Saint-Gobain que se distingue la verrerie française ; la cristallerie de Baccarat n'est pas moins estimée, et la substitution par Verneuil de la baryte à la chaux dans les verres d'optique permet à nos fabricants d'affronter toutes les concurrences, tandis que le talent d'un Gallé a renouvelé la tradition des maîtres décorateurs auxquels nous devons tant de vitraux merveilleux.

Non seulement notre verrerie artistique reste appréciée dans le monde entier, mais les meilleures lentilles pour phares et celle des somptueux observatoires américains sont d'origine française.

SOUDE A L'AMMONIAQUE En 1855, au moment où le procédé Le Blanc, étudié sous toutes ses faces, doté de moyens mécaniques perfectionnés, semblait assuré d'un long avenir, deux ingénieurs français, Rolland et Schloësing, installaient à Puteaux une usine destinée à retirer directement la soude du sel marin dissous dans les sources naturelles. Les eaux salées saturées d'ammoniaque et d'acide carbonique déposent à froid, sans aucune dépense de combustible, le bicarbonate de soude peu soluble, tandis que l'ammoniaque se combine à l'acide chlorhydrique du sel marin conformément aux lois de Berthollet. Le bicarbonate recueilli par filtration, puis calciné, donne du carbonate presque pur. Quant aux eaux séparées par les filtres, on en retire l'ammoniaque par distillation avec la chaux. Ce gaz soluble rentrant indéfiniment dans la fabrication constitue un simple agent de transmission. L'acide carbonique étant fourni par la décomposition du calcaire, le procédé se réduit finalement au dédoublement indirect du sel marin par le calcaire. Rien n'est plus simple que ce procédé. Il relève de l'art de l'ingénieur autant que de la chimie, car il s'agit d'établir des appareils qui, dans la circulation des liquides et des gaz ou dans la calcination des sels, ne laissent pas fuir le gaz ammoniac, fort coûteux. A ces difficultés mécaniques s'ajoute l'impossibilité d'utiliser la totalité du sel, parce que, la réaction inverse étant possible, un excès de sel favorise le rendement en carbonate de soude résultant de l'équilibre entre la réaction directe du sel sur le bicarbonate d'ammoniaque et l'action inverse du chlorhydrate d'ammoniaque sur le bicarbonate sodique. Cet inconvénient, aggravé par un fort impôt calculé sur le sel consommé, détermina l'abandon du procédé en France. Il fut repris à Couillet en Belgique et mis au point par les frères Solvay en 1865. Transporté à Dombasle-sur-Meurthe en 1875, il prit, sous l'action de l'ingénieur Hanrez, un essor tel qu'il s'est peu à peu substitué au procédé Le Blanc.

L'inconvénient du procédé à l'ammoniaque résulte de la non-utilisation du chlore, rejeté sous forme de chlorure de calcium. Il semblait donc qu'avec l'électricité à bon marché, la soude électrolytique dût supplanter à son tour le procédé Solvay, puisque l'action directe du courant dédouble le sel en chlore et en sodium que l'eau transforme en soude caustique. Mais si l'électrolyse adaptée au chlorure de potassium donne d'excellents résultats, il en est autrement pour le sel marin. D'une part, l'action d'un courant fournit une plus grande quantité de potasse que de soude caustique à cause de la supériorité de l'équivalent de la potasse par rapport à la soude (47 : 31) ; de plus, étant donnés les besoins en soude caustique, les grandes quantités de chlore en même temps obtenues et emmagasinées sous forme de chlorure

de chaux auraient amené la pléthore de ce produit et par suite sa rapide dépréciation, au point qu'il est plus avantageux de retirer la soude de la caustification du sel Solvay par la chaux. C'est le motif qui a déterminé une installation de ce genre en Camargue (Bouches-du-Rhône) par la société Solvay, qui n'a pas hésité à partir du sel raffiné pour obtenir la soude caustique nécessaire aux savonneries marseillaises.

Actuellement, le procédé Le Blanc est réduit à la transformation du chlorure de potassium en potasse. Cet alcali, indispensable aux fabricants de cristaux et de pierres fausses issues du verre réfringent découvert par Strass, bijoutier de Paris, se rencontre aussi dans le suint des moutons, comme l'a montré Maumené, et dans les vinasses de betteraves, où l'a trouvé Dubrunfaut. Le procédé Solvay mit en péril la fabrication de l'acide sulfurique, privé de son débouché principal : la transformation du sel marin en sulfate de soude, puis en soude. Pour sauver cette fabrication, qui mesure la prospérité de l'industrie chimique, on eut recours à la transformation des phosphates en superphosphates. La chimie agricole qui préconisait l'emploi de ces engrais vint à point appuyer le nouvel effort industriel.

CHIMIE AGRICOLE Nos connaissances concernant l'influence des éléments chimiques sur la végétation datent de la fin du dix-huitième siècle. Ce sont des chimistes qui, en dehors de la technique agricole des Gasparin, des Mathieu de Dombasle, ont mis scientifiquement en lumière cette influence.

Le tissu ligneux d'un végétal, invariablement formé de carbone associé aux éléments de l'eau, n'emprunte rien au sol. On sait, depuis Priestley et Th. de Saussure, que le carbone provient de la décomposition de l'acide carbonique de l'air sous l'action de la lumière, tandis que l'eau provient de la pluie et des arrosages. Par contre, l'azote accumulé dans les graines et les parties vertes n'est pas toujours emprunté à l'atmosphère. Il est généralement apporté par des engrais ammoniacaux ou nitrés, d'après les expériences de Proust, de Davy, de Liebig (Allemand) et de Schattenmann.

Les recherches de Th. de Saussure, de Liebig, de Gilbert et Lawes ont démontré que les phosphates sont également indispensables aux plantes. Toutefois les expériences de Payen (1832) sur leur utilisation ne concordaient pas avec celles du duc de Richmond (Anglais), promoteur de leur emploi, tandis que Chevreul prouvait que l'effet des engrais n'est pas absolu mais relatif. Les études rigoureuses de Boussingault, basées sur l'emploi de sols stérilisés, élucidèrent la question scientifiquement. Toute terre végétale renferme en proportion suffisante la chaux, la magnésie, l'alumine, la silice et le fer. Il n'en est pas de même de certains autres

corps dont l'analyse indique invariablement la présence dans toutes les plantes, mais que l'on retrouve difficilement dans le sol : l'azote, l'acide phosphorique et la potasse. Ces trois substances sont les facteurs essentiels de la fertilité. En semant certaines graines dans des argiles stérilisées par calcination et par des lavages acides, Boussingault s'aperçut que la germination était suivie d'un complet dépérissement. Au contraire, l'addition de phosphate de chaux, de silicate et d'azotate de potasse amena le développement normal de la plante comme en sol fertile. Après avoir ainsi établi l'effet capital de ces éléments mélangés, il étudia séparément l'action de chacun d'eux sur un grand nombre de végétaux ensemencés sur des sols épuisés par sa méthode. Il constata qu'aucun végétal n'arrive à maturité quand l'une des trois substances, acide phosphorique, potasse ou azote, fait défaut.

Le rôle relatif de l'une quelconque d'entre elles sur un sol végétal appauvri se détermine par l'addition au sol d'un poids connu de l'engrais en défaut. L'effet se mesure par la comparaison des poids et l'analyse des récoltes obtenues sur deux portions égales d'un même terrain dont l'une n'a pas reçu d'engrais. Telle est l'origine des champs d'expériences qui ont tant contribué à l'établissement de la culture intensive par une sorte de consultation directe du sol sur ses besoins. Boussingault a résumé ses belles recherches dans sa *Chimie agricole* et son *Économie rurale*, où sont en outre consignés les plus précieux renseignements analytiques sur les terres arables, sur les divers fumiers ou engrais, sur leur mode d'emploi rationnel, sur la valeur des fourrages. Ces ouvrages font ressortir l'appauvrissement progressif des sols les plus riches et la nécessité absolue d'y remédier. « C'est la sentine de Rome, disait Liebig, qui a consommé la ruine des provinces et déterminé l'effondrement de l'empire. » La masse énorme d'engrais jetés dans le Tibre, s'ils avaient été restitués au sol, en aurait maintenu la fertilité. Par le tout-à-l'égout, sous couleur de progrès hygiénique, nous serions retombés dans les mêmes errements sans l'intervention de la chimie, qui a provoqué la recherche de nouvelles sources d'engrais, précisé leur valeur, indiqué leur mode d'emploi.

Le guano du Pérou, analysé par Fourcroy et Vauquelin, contenait les trois principes fertilisants dont Boussingault avait constaté sur place les heureux effets. Il fut un des premiers engrais introduits dans la pratique et accepté par le consommateur à cause de son origine animale. L'importation française dépassait 50 000 tonnes en 1857. Puis apparurent les nitrates du Chili, dont l'exportation mondiale et annuelle s'est rapidement élevée de 65 000 à 1 300 000 tonnes dans la dernière moitié du dix-neuvième siècle ; cette ascension continue au siècle actuel.

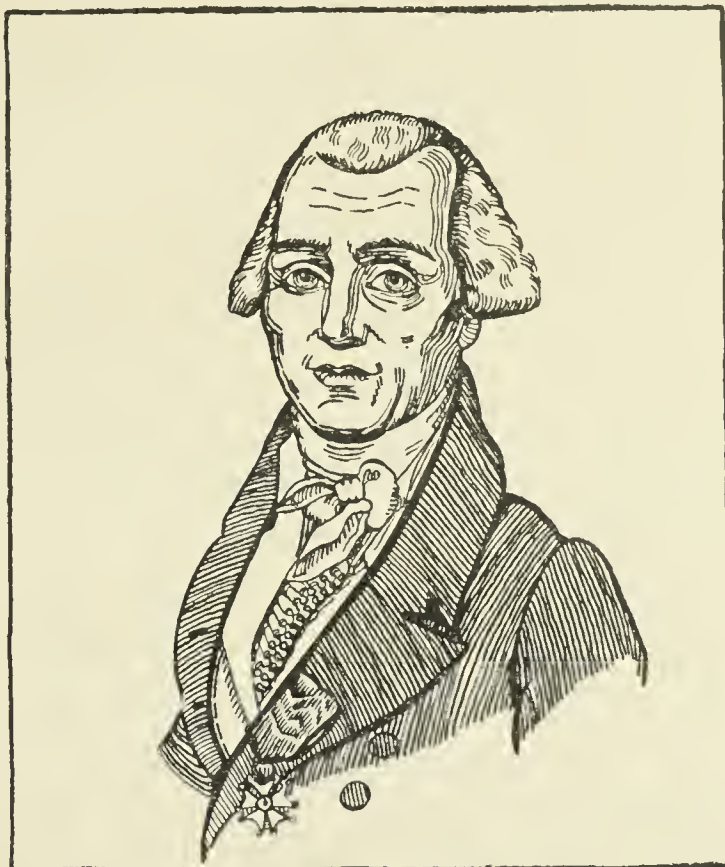
Ce formidable développement de la consommation appela nécessairement la

recherche de nouvelles ressources azotées. L'utilisation des chutes d'eau procura un moyen économique d'obtenir la combinaison directe de l'oxygène avec l'azote atmosphérique. Birkeland trouva le dispositif convenable, et les nitrates artificiels de Norvège vinrent concurrencer ceux du Chili. D'autre part, le carbure de calcium, obtenu par Bullier sous l'action des hautes températures électriques, absorbe immédiatement l'azote en donnant naissance à la cyanamide calcique qui dégage de l'ammoniaque au contact de la terre humide.

La synthèse directe de l'ammoniaque, mise en marche à Oppau en 1913, est une autre industrie formidable inspirée par la chimie agricole. La mécanique chimique expérimentale nous indiquera les principes sur lesquels repose cette synthèse, et les découvertes de Pasteur concernant la chimie biologique éclairciront la question de l'assimilation de l'azote par les plantes.

A l'extraction, par Balard, du chlorure de potassium des eaux-mères des marais salants s'ajouta la découverte des gisements potassiques de Stasfurth, de la vallée de l'Èbre et d'Alsace. Le chlorure de potassium prit une importance comparable à celle des nitrates, et sa consommation par les agriculteurs surpassa celle des nitrates chiliens quand la chimie agricole eut déterminé son mode d'emploi et fixé le rôle capital de ce sel dans la culture intensive.

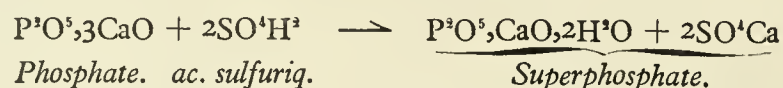
Quant aux phosphates, leur utilisation logique nécessita de longs efforts industriels et une véritable initiation agricole. En 1804, Th. de Saussure avait remarqué la présence du phosphate de chaux dans toute cendre végétale et dans les os des animaux. Pendant longtemps, les os furent la seule source de phosphates, mais ces sels, pour pénétrer dans l'organisme végétal, devaient être solubilisés à la faveur du gaz carbonique, dissous par les eaux pluviales. Grâce à leur état de division, les



VAUQUELIN (1763-1829)
(D'après un dessin de Belliard).

phosphates précipités, résidus des fabriques de gélatine, se dissolvant plus vite, agissent utilement sur les végétaux à la dose de 7 à 8 quintaux à l'hectare.

Ils ne suffiraient toutefois plus aux besoins actuels. Heureusement, dès 1818, Bertier avait fait connaître les nodules de nos plages du Pas-de-Calais ; puis de Molon et Meugy, les coprolithes des Ardennes ; Lory, les phosphorites de Vaucluse. On dut, pour activer l'assimilation de ces produits, les solubiliser par addition d'acide sulfurique. Ces phosphates tribasiques, ainsi transformés en plâtre et en phosphate acide soluble, constituent le mélange désigné sous le nom de superphosphate :



L'importance de cette industrie se chiffrait en 1913 par une consommation de quatre millions de tonnes pour la France, quadruple de l'utilisation mondiale du cuivre, malgré le développement des installations électriques. Ce débouché inattendu ouvert par la science est un frappant exemple de la réaction de la prospérité agricole sur le développement de l'industrie.

CHAUX ET CEMENTS L'emploi de la chaux, réservée autrefois aux constructions aériennes et à la fabrication du verre, s'est étendu logiquement à la métallurgie et à de nombreuses opérations de la chimie organique et minérale. Si sa fabrication remonte aux temps les plus reculés, il n'en est pas de même de celle des ciments, qu'on impute à tort aux Romains. En réalité, leurs procédés de construction, disparus à la suite des invasions barbares, ne comportaient pas son emploi ; Vicat l'a prouvé. La résistance de leurs mortiers tenait à l'usage de sables volcaniques, retrouvés à Pouzzoles et en Auvergne. On savait cependant au dix-huitième siècle que la cuisson de certaines pierres donnait des produits parfois capables de faire prise sous l'eau, quoiqu'on ignorât le processus du phénomène de prise et le moyen de reproduire artificiellement les matières hydrauliques, en dépit des efforts tentés dans tous les pays pour déterminer la cause de l'hydraulicité.

Avec le chimiste suédois Bergman, dont nul n'osait contester les dires, et malgré de nombreux échecs expérimentaux, on admettait que le manganèse en était l'agent actif. Pourtant, dès 1786, de Saussure, en étudiant la chaux de Chamonix, avait remarqué que celle-ci, bien que dépourvue de manganèse, durcissait sous l'eau, et il attribuait l'hydraulicité à la silice. En même temps, Chaptal montrait que,

pour obtenir des mortiers hydrauliques, il suffisait d'ajouter à une chaux grasse des pouzzolanes artificielles, dont il détermina le mode de fabrication : cuisson d'ocres ou de schistes. En 1806, Vitalis, dans un Mémoire sur les chaux de Senonches, émit l'idée que l'hydraulicité est due à la présence d'argile ; puis Collet-Descotils mit ensuite en évidence l'influence de la silice et rejeta nettement celle du manganèse. Mais il faut arriver en 1818 pour trouver une étude vraiment scientifique qui, bouleversant les idées acquises, devint le fondement de cette grande industrie. En opérant par analyse et par synthèse, Vicat, ingénieur des ponts et chaussées, établit sans contestation possible qu'on n'obtient un produit vraiment hydraulique qu'en cuisant un mélange de carbonate de chaux et d'argile. Son invention, aussitôt réalisée à Meudon, fournit les premiers ciments artificiels dont la qualité variait à volonté avec la composition des mélanges, les rapprochant de ceux de Portland, de ceux de Boulogne-sur-Mer ou de Vassy qu'on venait de fabriquer par calcination de certains galets trouvés dans ces pays. D'autre part, en 1856, Rivot et Chatoney, reconnaissant la formation de silicates et d'aluminates tricalciques, démontrèrent que, sous l'action de l'eau de gâchage, le dédoublement de ces sels détermine une cristallisation qui constitue le phénomène de prise, et Frémy, en 1856, étendant les investigations de Rivot, montra toute la complexité du problème et suscita de nombreuses recherches. De 1882 à 1884, plusieurs mémoires de Landrin précisèrent l'action de la silice, et M. Le Chatelier, en appliquant l'examen microscopique en plaques minces, confirma les idées de ses prédécesseurs.

Depuis cette époque et en dépit de nombreuses études, la chimie des chaux et ciments n'a pas fait de progrès sensibles. Par contre, l'industrie elle-même, surtout depuis les expériences de Considère sur les ciments armés et les travaux à la mer, a progressé à pas de géant. Outre la partie mécanique, ce labeur de tant de praticiens éminents, agents anonymes de nos sociétés industrielles, a porté sur l'extinction des produits vifs et des produits finis, la cuisson à haute température, et la mise au point de la trempe des produits fabriqués.

Le blutage de la chaux se faisait depuis 1841 par le procédé de Villeneuve, quand, en 1865, un ouvrier d'usine, Lascombe, remarquant que les rejets du blutage de la chaux, entassés à l'air, forment après quelques années des massifs excessivement durs, eut l'idée de broyer ces rejets, — les grappiers. Il obtint ainsi un ciment artificiel d'excellente qualité, et ce procédé perfectionné devint la base d'une industrie florissante développée presque exclusivement en France. Mais ce fut par l'étude systématique du durcissement, de la résistance et de la prise des pâtes pures et des mortiers que les praticiens parvinrent à fabriquer des ciments très résistants à prise

rapide. Pour atteindre ce but, il ne suffit pas d'opérer à la haute température de formation d'un silicate très actif tel que $\text{SiO}_2, 2\text{CaO}$; il faut encore en empêcher l'altération par un refroidissement brusque, comme l'ont constaté les chimistes américains Day et Sepherd. Il faut, en d'autres termes, maintenir par une véritable trempe la composition de corps instables entre leur température de formation et la température ordinaire.

Vicat avait vu que les roches alumineuses procurent des aluminates de chaux qui se solidifient rapidement par suite de la formation d'hydrates. Mais, aux températures relativement basses dont disposait le savant ingénieur, ces ciments alumineux étaient désagrégés par l'eau de mer et par les eaux séléniteuses, parce qu'ils renfermaient de l'alumine et de la chaux en liberté, susceptibles de former le sulfo-aluminate magnésien de Candlot, dont les cristaux volumineux disloquent les maçonneries. Aussi avait-on employé à Suez les produits siliceux fondus du Teil, qui ont résisté. Mais encore une fois, ce fut l'examen comparé des diverses pâtes qui conduisit des praticiens instruits dans nos grandes écoles à ce résultat inattendu, contraire aux idées en cours : l'obtention de produits alumineux supérieurs aux ciments siliceux, insensibles au gypse générateur du sel Candlot et plus résistants quand les conditions de prise sont observées. C'est le cas du ciment alumineux fondu de la société Pavin de Lafarge. Signalons, à propos des études de Candlot, l'influence des actions par voie humide sur la fabrication de ciments, influence publiée par Demarle en 1850.

La chimie, sans cesse agissante, a suggéré d'autres fabrications de mortiers hydrauliques. L'analyse des laitiers des hauts fourneaux, si longtemps encombrants, ne laisse aucun doute sur la possibilité de transformer ces résidus en ciment par addition de chaux. Partout on est entré dans cette voie, bien que la qualité des matériaux obtenus reste variable. Simultanément l'usine Cavalier, à Pont-à-Mousson, fabrique, par moulage, des briques et moellons agglomérés par la chaux. Telle est la variété des résultats dus à l'introduction de la science, par l'initiative de Vicat, dans des questions si longtemps stationnaires.

CÉRAMIQUE ET PORCELAINE Ainsi l'argile employée de temps immémorial à la fabrication des briques et des poteries trouvait dans l'invention de Vicat un nouvel emploi dont la portée est immense. Cependant on ignorait toujours en Europe le secret de la composition des porcelaines chinoises. On savait seulement qu'elles résultaient d'une argile blanche, très pure, infusible, le kaolin, analysé par Ebelmen. Ce produit, recherché par nos géologues, fut trouvé

à Saint-Yrieix (Haute-Vienne). Substitué aux matières vitrifiables caractéristiques du *vieux Sèvres*, l'emploi du kaolin transforma radicalement la nature et la fabrication des produits de notre célèbre manufacture nationale. Sous l'impulsion successive de savants comme Ebelmen, Regnault, Lauth, Vogt, on reconstitue à Sèvres la porcelaine de Chine et sa riche décoration. On obtint même un biscuit plus dur et moins fusible grâce au perfectionnement du chauffage, mais ce fut au détriment de la décoration, car un certain nombre d'oxydes colorants sont volatilisés ou altérés au grand feu. Cette cause reconnue, on y remédia en abaissant la température d'incorporation de la couverte colorée suivant les méthodes des anciens émailleurs.

L'OUTREMER Au lieu d'utiliser exclusivement le kaolin à la fabrication de la porcelaine si appréciée, on fit de ce silicate le point de départ d'une industrie spéciale sans aucun lien avec la céramique qui, depuis Bernard de Palissy, accaparait l'attention. En 1827, après avoir reconnu la nature argileuse du lapis-lazuli ou bleu d'outremer et celle de ses principaux constituants, Guimet, ingénieur des manufactures de l'État, reproduisit artificiellement ce colorant en chauffant un mélange de kaolin, de résine, de soufre et de carbonate de soude, intimement broyés. Le kaolin, qui donne les plus belles porcelaines, fournit aussi les plus beaux bleus, sans doute parce qu'il est exempt de fer.

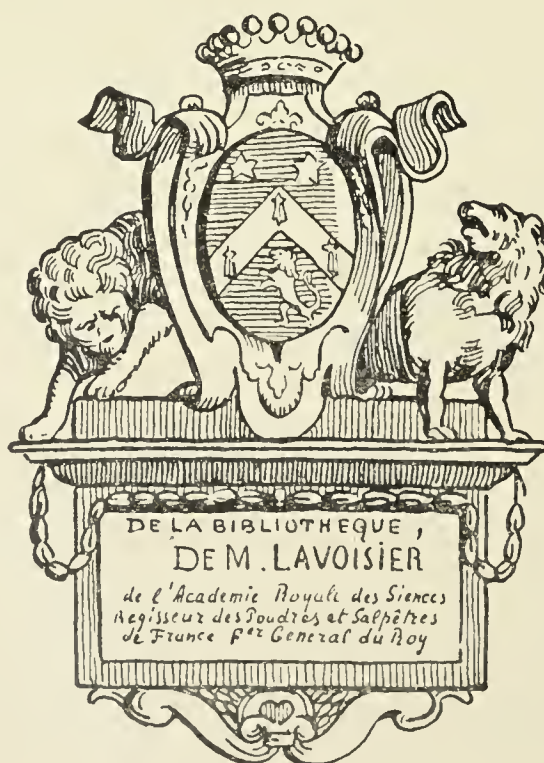
Cependant, si l'on remplace le carbonate Le Blanc par le carbonate Solvay, quatre fois moins coûteux, ou la résine par le noir de fumée, le bleu cesse d'apparaître. Un de ces chimistes peu connus, ou parfois méconnus, auxquels notre industrie chimique doit tant de perfectionnements, M. Moynet, élucida cette question. Le carbonate de soude Le Blanc est toujours caustique, tandis que cette qualité manque au carbonate Solvay. Il fallait donc essayer de caustifier celui-ci. L'expérience réussit. De même la substitution d'autres carburants moins coûteux et moins incommodes que la résine se fit sans difficulté et sans inconvénient pour l'obtention de l'outremer et de ses nombreux dérivés.

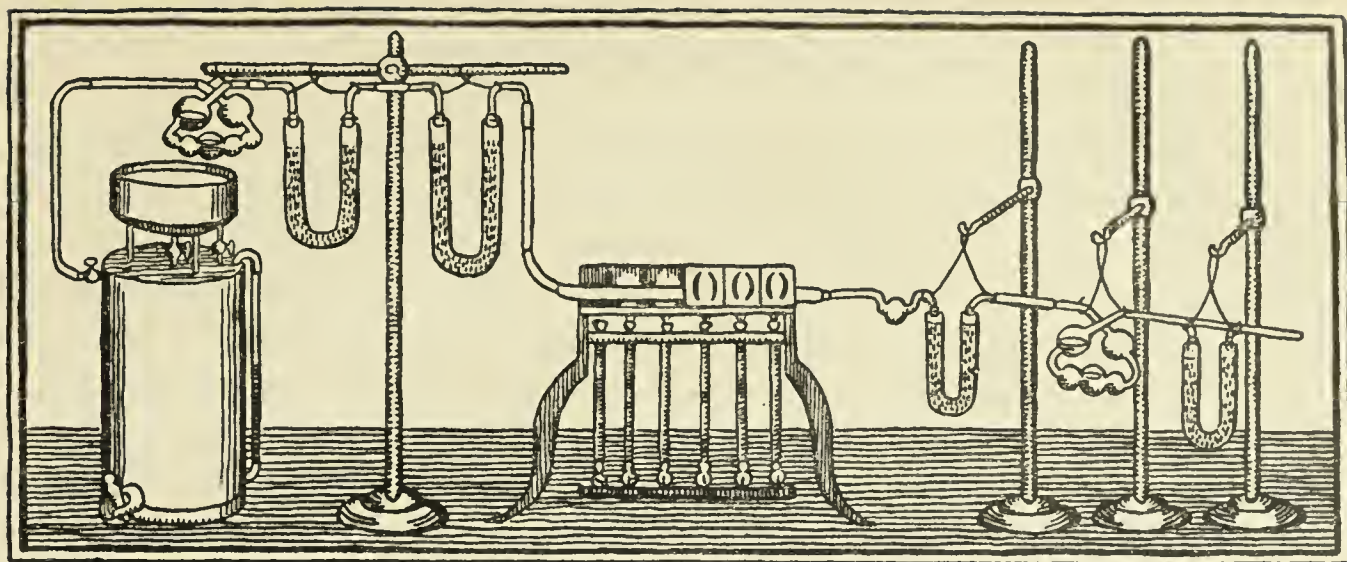
REPRODUCTION DES PIERRES PRÉCIEUSES Depuis longtemps, on utilise le cristal très réfringent, trouvé par Strass, pour fabriquer des pierres fausses : imitation du diamant, du rubis, de l'émeraude, du saphir, etc. Tout autre est le problème de la reproduction des minéraux appelés *pierres précieuses*. Pour fabriquer un corps possédant toutes les propriétés physiques et chimiques d'un de ces minéraux naturels, le corindon, Ebelmen, directeur de la manufacture de Sèvres, fit cristalliser l'alumine pure, blanche mais amorphe, par dissolution dans l'acide borique.

Celui-ci, volatilisé dans les fours à porcelaine, déposait le corindon dur et transparent. Le rubis étant du corindon coloré par des traces de chrome, il suffit à ce savant d'ajouter une trace d'acide chromique à la dissolution précédente pour obtenir des cristaux rouges identiques au rubis et, comme lui, insensibles aux rayons X.

Frémy et Feil, après avoir dissous l'alumine imprégnée d'acide chromique dans l'oxyde de plomb fondu, puis vitrifié l'oxyde par la silice du creuset fortement chauffé, isolaient d'innombrables cristaux de rubis microscopiques. Ceux-ci n'avaient aucune valeur commerciale ; mais ils donnaient, par fusion, des pierres assez grosses pour trouver un écoulement sur le marché de la joaillerie. Leur origine artificielle se décelait seulement par la présence de petites bulles d'air visibles au microscope. Aujourd'hui la synthèse du rubis se fait couramment en appliquant ce principe. A l'aide d'un chalumeau à gaz alimenté par l'oxygène résiduel de l'air liquide obtenu par le procédé Claude, on fond de l'alumine chromatée. En maintenant le mélange à l'état pâteux, Verneuil a obtenu des pierres assez grosses qui conservent leur transparence à l'état solide, alors qu'une fluidité complète déterminerait leur opacité par formation de nombreux cristaux enchevêtrés pendant le refroidissement.

Ayant ensuite remarqué que la coloration bleue du saphir tient à la présence de rutile et d'oxyde de fer, Verneuil reproduisit cette gemme par la fusion pâteuse d'un mélange de ces colorants avec l'alumine. On voit par ces exemples, tirés des seuls composés de l'alumine, le lien étroit qui unit la chimie à la minéralogie.





CHAPITRE II

CHIMIE ORGANIQUE

I. Période de Chevreul. Recherche des espèces organiques. — Méthodes diverses : Analyse immédiate. — Corps gras et méthode de fractionnements. — Bougies stéariques. — La cellule végétale et ses transformations. — Découverte des actions diastatiques. — Analyse élémentaire. — II. L'école atomistique de Dumas. Isomérisie. — A. Phase moléculaire. 1^o Classification des métalloïdes par Dumas. Sa méthode et ses principes. Notion moléculaire. — 2^o Fonctions chimiques. — 3^o Radicaux. — 4^o Substitutions. — B. Retour aux atomes. — Rôle de Laurent, son œuvre. — Gehhardt; ses débuts; définition de l'atome. — 1^o Homologie. — 2^o Théorie des types. — 3^o Extension des substitutions aux radicaux. — Conception générale des radicaux. — C. Wurtz et son œuvre. — D. Les extensions de Regnault et de Cahours.

PÉRIODE DE CHEVREUL



UNE espèce animale ou végétale, dans son ensemble et ses parties, est organisée. Elle possède les fonctions multiples nécessaires à sa vie ; elle élabore des composés définis qui sont les corps organiques qu'il faut extraire, puis caractériser.

La séparation de ces matières définies exemptes de tout mélange nécessite un ensemble d'opérations délicates que Chevreul a dénommé *analyse immédiate*. Avant d'étudier ces constituants, il est indispensable d'en contrôler la

pureté. En chimie minérale, ce contrôle résulte de l'application des principes cristallographiques posés par nos minéralogistes Haüy et Bravais. Il a pour critérium la fixité de composition imposée par la loi de Proust. En chimie organique, ces règles ne s'appliquent pas aux nombreuses espèces liquides ou incristallisables, ni à celles, plus nombreuses encore, qui possèdent une composition identique bien que leur nature et leurs propriétés soient absolument différentes. Cette question d'isomérisie, qui domine la chimie organique, avait frappé Chevreul au début du dix-neuvième siècle. Avant lui on connaissait déjà des corps importants : l'alcool, le vinaigre, l'urée, que Rouelle avait retirée de l'urine, les acides des fruits et du lait aigre, isolés par le Suédois Scheele, le glucose, la mannite et la leucine, extraits par Proust. Il existait des travaux intéressants sur le lait et le vin ; mais c'est de Braconnot surtout (1780-1851) que date la recherche systématique des composés immédiats. Contemporain de Chevreul, il consacra la plus grande partie de sa vie à la chimie organique, fort délaissée à cette époque. Sa méthode fit école en dépit des moyens élémentaires alors usités. Il découvrit l'acide fungique des champignons, la populine des peupliers, et principalement la légumine, albumine soluble des semences de légumineuses ; il retira la leucine de la laine et la quercite du gland doux des chênes ; enfin, par action de l'acide azotique sur la fécule, il obtint une véritable matière explosive, la première en date des poudres sans fumée : la xyloïdine.

Sa méthode fut appliquée à la découverte de la morphine cristallisée, obtenue par Seguin et par Derosne, puis caractérisée comme alcaloïde par l'Allemand Serturmer ; elle ouvrit l'ère des travaux classiques de Pelletier et Caventou sur la strychnine, la brucine, la vératrine et surtout la quinine (1817-1822). C'est encore elle qui aida Robiquet, élève de Vauquelin, à extraire l'asparagine des asperges, et avec Colin, l'alizarine et la purpurine contenues dans la garance. En 1830, avec Boutron, Robiquet préludait à la connaissance des ferments solubles en démontrant que l'essence d'amandes amères ne préexiste pas dans ce fruit, mais qu'elle résulte du dédoublement, sous l'action de l'eau et de l'émulsine, d'un glucoside : l'amygdaline, dédoublement précisé plus tard par Liebig et Wœhler.

Ces belles découvertes ont passé au second plan ; les travaux de Chevreul les ont fait oublier, parce que, comme l'a dit Berthelot, « ils ont imposé aux savants une discipline inflexible, inconnue jusque-là dans les études de la chimie végétale et animale, et donné aux résultats expérimentaux le caractère qui fait la certitude scientifique ».

MÉTHODE DES FRACTIONNEMENTS Par l'emploi raisonné de solvants variés, dont il combinait l'action, Chevreul réalisa une véritable méthode de *dissolution fractionnée*, destinée à séparer les diverses espèces des mélanges qui engendrent les corps naturels. Puis, usant de la fixité des points de fusion et d'ébullition de tout corps défini, il fit du thermomètre un guide rationnel des opérations, en même temps qu'un moyen simple et précis de contrôle.

Ces règles de Chevreul régissent maintenant l'analyse immédiate, et voici comment il les appliqua aux corps gras naturels.

CORPS GRAS L'étude directe de ces matières grasses, suif, graisses, huile..., n'aboutirait qu'à un résultat confus, variable avec leur origine. Au contraire, une trituration du suif avec de l'éther additionné d'alcool enlève les portions liquides qui, par leur composition, se rapprochent des huiles. En répétant la même opération avec d'autres portions de solvant vierge, on arrive rapidement, par ces épuisements successifs, à isoler un résidu solide, fondant exactement à 70 degrés après compression et dessiccation : c'est la stéarine. Les portions liquides rassemblées sont, après évaporation de l'éther, épuisées de la même façon par l'alcool. Elles abandonnent à leur tour une nouvelle espèce chimique, la palmitine, fusible à 61 degrés, et identique au corps solide extrait de l'huile de palme. Les portions les plus difficiles à solidifier forment le liquide appelé oléine.

Ces corps définis, qui sont en petit nombre, constituent par leur mélange la généralité des corps gras, l'oléine dominant dans l'huile d'olive, et la stéarine dans le suif. Les différences de fusibilité des huiles et des graisses, comme celle des alliages métalliques auxquels les comparait Chevreul, sont uniquement dues à la diversité des proportions des espèces constitutives.

La glycérine, depuis longtemps découverte par Scheele, existe dans tous ces principes immédiats. Déplacée par les alcalis, qui se transforment alors en savons, même dans le vide et à l'abri de l'air, elle apparut à Chevreul comme une véritable base commune à tous les corps gras, à l'instar de l'alcool, qui, d'après Thénard, était la base des éthers-sels. On verra le parti que Berthelot tira de cette conclusion trente ans plus tard.

LES BOUGIES STÉARIQUES Des savons Chevreul isola les acides qui, comme les graisses correspondantes, sont caractérisés par un point de fusion invariable, et un point de solidification plus net, sinon plus élevé, que celui du corps gras générateur : l'acide stéarique $C^{18}H^{36}O^2$ prend à 70 degrés ;

l'acide palmitique $C^{16}H^{32}O^2$, extrait de l'huile de palme ou du blanc de baleine, vers 62 degrés. Ces composés n'étant pas sujets aux surfusions présentées par les graisses, il songea à les substituer au suif dans la fabrication des chandelles. Ce fut l'origine des bougies blanches, dures et inodores, destinées à remplacer la cire dans l'éclairage



CHEVREUL

(D'après un dessin d'Ambroise Tardieu (1825).

de luxe. Associé avec de Milly et Motard, Chevreul fonda la première fabrique de bougies stéariques à la barrière de l'Étoile, où son procédé fut mis au point, si bien qu'aucun progrès dans l'éclairage n'a fait disparaître cette industrie, qui reste une ressource en cas de grève instantanée.

A cette importante application se sont bientôt rattachés l'établissement de nombreux fondoirs, l'extraction de la glycérine et sa transformation en dynamite par Nobel, en même temps qu'on obtenait des savons en utilisant l'acide oléique, déchet des stéarinerie. D'emblée, l'œuvre de Chevreul affirmait sa vitalité en rayonnant à la fois sur la pratique et sur la science. Un seul corps d'aspect graisseux faisait

exception : le blanc de baleine ou spermacéti ne renfermait pas de glycérine, mais une sorte de base, l'alcool cétylique, dont Dumas devait tirer parti.

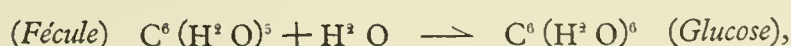
L A CELLULE VÉGÉTALE ET SES TRANSFORMATIONS

La végétation produit un ensemble de corps primordiaux par la fixation de l'eau sur le carbone emprunté à l'acide carbonique de l'air. L'étude de ces hydrates de carbone échappait aux préceptes de Chevreul, parce que plusieurs d'entre eux sont insolubles et ne fondent pas. Elle a suscité des recherches de premier ordre. Les trans-



CÉRAMIQUE. — PORCELAINES TENDRES DE VINCENNES (1753)
(Musée de Sèvres)

formations successives de ces substances en fibres végétales, matières amylacées, sucres, ont provoqué une véritable révolution économique et donné lieu à une découverte, d'abord peu remarquée, mais qui se place aujourd'hui au premier rang des connaissances scientifiques : celle des ferments solubles ou diastases. D'abord Dubrunfaut, né à Lille en 1797, un des promoteurs de la fabrication du sucre de betteraves, tira de ces métamorphoses l'industrie de l'alcool de grains, en montrant dès 1822 que la saccharification des féculs était due à l'orge germée ou malt. C'était un phénomène d'hydratation :



dont Payen et Persoz, dix ans plus tard, trouvaient la cause. Triturant le malt avec de l'eau tiède et filtrant cette infusion, ils précipitèrent par addition d'alcool une substance blanche amorphe qui, ajoutée à de l'amidon délayé dans de l'eau à 60 degrés, transformait en sucre la matière amylacée, quelle qu'en fût la provenance. On appela *ferment soluble* cet agent de transformation, qui n'a rien d'un ferment vivant puisqu'il est soluble dans l'eau. Cette découverte incita aux recherches de ces agents diastasiques, commencées par Robiquet et Colin. On les trouva dans de nombreuses matières végétales et animales. En 1839, Bussy montra que l'odeur pénétrante de la moutarde noire résulte du dédoublement d'une matière cristallisée par l'action de la myrosine en solution aqueuse, dont la présence dégage le vésicant odorant appelé sulfocyanate d'allyle. En 1860, Berthelot trouva l'invertine, que Béchamp étudia. Entre temps apparurent les espèces variées qui accompagnent les glucosides si nombreux dans le règne végétal. Quant au rôle des diastases, chacun connaît la pepsine de la salive, les lipases de M. Hanriot, qui, avec le suc gastrique de Blondlot, concourent à la digestion des aliments, etc. L'importance de la découverte de Payen et Persoz ressortira mieux encore de son rapprochement avec les recherches de Pasteur sur la fermentation et avec la catalyse.

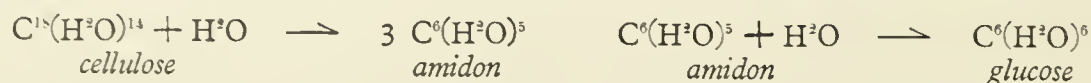
D^{EXTRINE} Entre le glucose et l'amidon, l'emploi du polarimètre de Biot décela un composé intermédiaire isolé par Persoz, la dextrine, dont la dissolution gommeuse est une colle, celle des timbres-poste, des enveloppes... Elle se fabrique par le procédé de Persoz : hydratation en vase clos de l'amidon imprégné d'eau légèrement additionnée d'acide azotique. L'action de la température ne doit pas être prolongée, car un second degré d'hydratation changerait finalement la dextrine en glucose.

CELLULOSE L'identité de composition de toutes les cellules végétales, démontrée par Payen à la même époque, est une grande découverte. En effet, cette matière primordiale, qu'il appela cellulose, existe à l'état de pureté dans le coton, dans la moelle du sureau, dans les fibres textiles d'origine végétale, etc. Dès lors, il n'y a pas besoin de chiffons pour faire le papier ; la paille, le bois, débarrassés des matières incrustantes et minérales, donneront le moyen d'obtenir ce produit et les fibres textiles elles-mêmes. C'est le principe de grandes industries modernes en voie de réalisation.

De plus, le papier à filtrer immergé dans l'acide sulfurique à 70 pour 100 se transforme en parchemin végétal, l'hydrocellulose d'Aimé Girard, et, successivement, si on prolonge le contact, en matière amylacée, et finalement en glucose, par une suite d'hydratations exprimées comme il suit :



PAYEN (1795-1871)



La filiation de ces divers composés établie, on en déduit l'existence de propriétés communes à tous ces corps et la possibilité, par exemple, de remplacer la xyloïdine de Braconnot par la nitrocellulose de Schœnbein. Depuis, Maquenne a réussi à revenir de l'amidon à la cellulose.

Ajoutons enfin que le glycogène, dont la découverte par Claude Bernard dans le foie des animaux a fait date en chimie comme en biologie, et dont Arm. Gautier et Garnier ont trouvé des variétés, se rapproche de l'amidon et de la dextrine soluble, puisqu'il se transforme en sucres, par hydratation.

Au début du dix-neuvième siècle, les chimistes, pour caractériser une espèce organique, se contentaient souvent d'en observer l'aspect cristallin, l'odeur, la saveur et la couleur. Même après la découverte des alcaloïdes susceptibles de se combiner aux acides, non seulement ils persistaient à croire que l'élaboration de composés basiques par l'organisme vivant était impossible, mais l'analyse chimique était une opération si difficile qu'on niait la présence de l'azote dans la molécule

organique. Il fallut que Bussy, ancien élève de l'École polytechnique devenu directeur de l'École de pharmacie, parvint à faire les premières analyses exactes de la brucine, de la morphine, de la strychnine, de la quinine, pour convaincre ses contemporains que tous ces corps renferment de l'azote en combinaison.

A N A L Y S E L'analyse élémentaire, qui a pour objet de déterminer
É L É M É N T A I R E la proportion des corps simples contenus dans la molécule organique, se réduisait à des combustions endiométriques fort délicates. Fondée sur l'emploi de l'oxyde de cuivre, la méthode par combustion lente de Dulong était un progrès, que Dumas allait porter à la perfection, le remarquable travail de Bussy ne faisant que trop sentir la nécessité d'un procédé analytique impeccable.

Pour doser rigoureusement les quatre éléments, le carbone, l'hydrogène, l'oxygène et l'azote, qui concourent à peu près exclusivement à la formation des corps organiques, et en déterminer la proportion centésimale, Dumas brûlait un poids p de matière mélangée d'oxyde de cuivre dans un long tube en verre peu fusible. Si on veut doser l'hydrogène et le carbone, on fait circuler dans le tube un courant lent d'oxygène, puis d'air. Du poids de l'eau dégagée par la combustion et recueillie dans un tube à ponce sulfurique, on déduit le poids a d'hydrogène renfermé dans le poids p ; et du poids de l'acide carbonique retenu par la potasse en dissolution et en morceaux placée à la suite du tube à ponce, on déduit le poids du carbone c ; le poids de l'oxygène est égal à la différence $p-(a+c)$.

Si on veut doser l'azote, on remplace, dans une autre combustion, le courant d'air par un courant d'acide carbonique qui aboutit sous une éprouvette remplie de potasse dissoute et placée sur une cuve à mercure. Du volume de l'azote recueilli, on déduit le poids de cet élément. Le remplacement de l'oxyde de cuivre par une spirale de platine porté à l'incandescence est un perfectionnement préconisé par MM. Breteau et Leroux pour activer l'opération.

C'est par combustion sur l'oxyde de cuivre qu'en 1841, Dumas et Stas fixèrent définitivement le poids proportionnel du carbone, ramenant à 12 le poids atomique 12,2 trouvé par Berzélius. Cette rectification était ainsi jugée par Liebig dans une lettre qu'il adressait à ce sujet à son paternel ami Berzélius : « Il est impossible d'atteindre avec un appareil aussi compliqué une précision qui fixe la troisième décimale... Les Français n'ont aucun sentiment de l'honneur vrai, aucun sens du droit et de la dignité. Ils s'occupent de spéculations théoriques sans utilité, rien que pour satisfaire leur fatuité et leur arrogance. »

Ce dénigrement par le chef de l'école allemande met en relief la supériorité

des méthodes pratiquées en France, surtout quand on l'oppose à cette appréciation du même auteur écrivant dans son autobiographie après l'adoption universelle du procédé de Dumas : *Ce qui me frappait le plus dans les travaux des Français, c'était leur profonde vérité, et le soin qu'ils mettaient à écarter les explications basées sur des apparences. C'était tout l'opposé pour les travaux allemands. En abusant des déductions, ils avaient fait perdre à la théorie scientifique la solidité de la charpente* (Ber. Chem. Ges., 1890).

II

L'ÉCOLE ATOMISTIQUE DE DUMAS. L'ISOMÉRIE

A. — PHASE MOLÉCULAIRE

L'ISOMÉRIE L'isomérisie, signalée par Chevreul, est la grande difficulté de la chimie organique. Pour que quatre éléments H, C, N, O suffisent à la formation d'espèces organiques qui se comptent aujourd'hui par centaines de mille, il faut non seulement que les molécules constituées par leur assemblage aient un poids atomique différent, comme l'acétylène C^2H^2 et la benzine $3C^2H^2$ ou C^6H^6 , mais encore que, dans les molécules isomères engendrées par le même nombre d'atomes, ceux-ci soient disposés de manières différentes. On comprend tout de suite, par l'assimilation des éthers-composés aux sels, que l'acétate de méthyle diffère du formiate d'éthyle quoique ayant même composition et même poids moléculaire $C^4H^8O^2$, puisque le premier est un composé de l'acide acétique et l'autre un dérivé de l'acide formique. Si dans un édifice un portail de pierre remplacé par un portail en fer entraîne des propriétés différentes, de même dans une molécule le remplacement d'un atome ou d'un groupe d'atomes (radical) par un autre donne un composé différent. De plus, des édifices constitués par trois pièces rectangulaires, fussent-elles identiques, différencieront selon que les trois pièces seront agencées bout à bout, accolées par leur grand ou leur petit côté, ou suivant qu'elles formeront des ailes



Ces figuratives des corps isomères s'appliquent à la représentation des molé-

cules matérielles. La simplicité étonnante de cette conception en fait la grandeur. Sa mise au point a exigé les efforts et les âpres discussions de savants géniaux. Il fallut définir l'édifice, c'est-à-dire la molécule, puis en distinguer les matériaux constituants représentés par nos rectangles, et trouver les règles de leur assemblage. Ces constituants ont finalement apparu sous forme de radicaux simples : Cl ou H ou O, et de radicaux composés : (CH^1) ou (C^1H^1O) etc., susceptibles de se relier les uns aux autres par des tirets exprimant leur valence, propriété dont voici l'origine et dont le tableau d'homologie de Gerhardt montrera la première adaptation.

CLASSIFICATION DES MÉTALLOÏDES PAR DUMAS (1826-1828)

le Lavoisier de la chimie organique. Le savant qui, dans l'obscurité de ce sujet,

La plupart des chimistes de ma génération considéraient J.-B. Dumas comme

avait d'instinct trouvé les voies et les avait si vivement éclairées, nous apparaissait comme un incomparable génie. Il est incontestable que, dès 1826, dans son *Mémoire : Sur quelques points de la théorie atomistique*, Dumas formulait les deux principes fondamentaux de la chimie organique : d'une part l'adaptation à la chimie de la notion moléculaire, hier encore contestée, aujourd'hui admise par tous ; d'autre part, une classification des métalloïdes, qu'en 1828 il basait sur leur capacité atomique pour l'hydrogène, autrement dit sur leur valence, qui est le pouvoir pour un atome d'absorber soit un, soit deux, soit trois, etc., atomes d'hydrogène. Ces atomes sont dits monovalents, bivalents, trivalents, etc. Ce caractère entraîne les autres propriétés essentielles des éléments et déter-



J.-B. DUMAS (1800-1884)

Fondateur de l'École centrale des arts et manufactures.

mine la forme de ses composés principaux. Le choix d'un caractère dominant dans les plantes avait amené Jussieu à faire sa classification botanique ; le même principe amena Dumas à grouper les éléments non métalliques de la chimie de la façon que résume le tableau suivant, reproduit dans sa *Chimie appliquée aux arts* :

CLASSIFICATION DE DUMAS (1826-1828)

1 ^{er} GENRE —	<i>Hydrogène.</i>			
2 ^e GENRE —	<i>Fluor</i>	<i>Chlore</i>	<i>Brome</i>	<i>Iode</i>
3 ^e GENRE —	<i>Sélénium</i>	<i>Soufre</i>	APPENDICE (1)	<i>Oxygène</i>
4 ^e GENRE —	<i>Phosphore</i>	<i>Arsenic</i>	APPENDICE	<i>Azote</i>
5 ^e GENRE —	<i>Bore</i>	<i>Silicium</i>	APPENDICE	<i>Carbone.</i>

SA MÉTHODE ET SES PRINCIPES Les deux notions de molécule et de valence ont eu sur la science une influence comparable à celle du principe de Lavoisier ; mais rien ne montre mieux leur prépondérance que cette lettre de Liebig :

MON CHER DUMAS,

Depuis plus d'un quart de siècle, une destinée particulière imprime la même direction à nos efforts dans la science à laquelle nous avons consacré notre vie. Bien que les moyens d'arriver au but commun aient souvent été différents, nous nous sommes cependant toujours rencontrés, et nous nous sommes rendu la main au moment même de l'atteindre.

Non seulement votre pays, mais le monde scientifique entier reconnaît l'étendue, la profondeur, l'importance de vos travaux et de vos découvertes ; personne toutefois n'apprécie mieux que moi les difficultés que votre génie a dû surmonter pour parvenir aux résultats précieux qui forment en grande partie la base de notre science moderne. Vous n'êtes jamais descendu dans l'arène sans triompher des obstacles contre lesquels vous aviez à lutter.

Permettez-moi, en témoignage de ma haute estime pour les services que vous avez rendus à la science et au monde, de vous dédier cet ouvrage...

Gessen, 1851, juin.

Si parfois Dumas a hésité devant l'application rigide des principes qu'il avait énoncés, ses disciples, Laurent et Gerhardt surtout, les ont rétablis, en apportant à l'œuvre commune cette foi inaltérable sans laquelle le génie reste stérile. Aussi, pour apprécier l'école de Dumas, faut-il se garder d'ac-

(1) L'*appendice* est le modèle ou le type parfait du genre.

centuer les dissentiments de ces trois grands hommes, et, dans l'exposé des idées et des faits sur lesquels est basée la chimie moderne, indiquer les efforts de chacun d'eux.

1^{re} Notion moléculaire.

Si la raison de simplicité importe moins à la fixation des poids atomiques que les similitudes chimiques, celles qu'avait choisies Berzélius étaient cependant moins générales et moins nettes que la notion de molécule.

Définie par Ampère, celle-ci est la particule ultime caractéristique d'un corps défini, elle occupe un volume constant indépendant de sa nature. Sans doute le poids absolu de ces particules est trop petit pour être déterminé par l'expérience directe ; mais son rapport au poids de la particule d'hydrogène est égal à celui des poids d'un litre du corps et d'un litre d'hydrogène. Le quotient de ces deux pesées est, par définition, la densité DH du corps par rapport à l'hydrogène, et il se confond avec le poids moléculaire P , rapporté à la molécule d'hydrogène ; et $P = 2 DH$ si l'on suppose que cette molécule pèse 2.

Ce fut pour fixer ces valeurs moléculaires que, dès 1826, Dumas entreprit son grand travail sur les densités de vapeur, et qu'il imagina une méthode restée classique et féconde. Les molécules des corps simples lui apparurent alors comme un assemblage de deux particules identiques, de deux demi-atomes : « Un volume de chlore et un volume d'hydrogène en font deux d'acide chlorhydrique, disait-il. Un volume d'azote et un volume d'oxygène en font deux de bioxyde d'azote. Il faut, par conséquent, que l'atome de chlore et celui de l'hydrogène puissent se couper en deux pour donner naissance aux deux atomes de gaz chlorhydrique résultant de leur combinaison. Il faut de même que l'atome d'azote et l'atome d'oxygène se coupent en deux pour former les atomes de bioxyde d'azote. » Dumas voyait fort bien que ces demi-atomes résultant de la réaction chimique étaient les vrais atomes et, en rapprochant l'idée d'atome et l'idée de volume, il espérait trouver une expression expérimentale de la notion atomique sur laquelle il voulait baser son système. Cette attente, conforme à l'expérience pour les gaz oxygène, azote, chlore..., ne l'était plus pour les vapeurs de soufre, de phosphore et d'arsenic. En effet, par suite des analogies admises entre l'eau et le gaz sulfhydrique, la molécule (1 vol.) de celui-ci doit renfermer un demi-volume de vapeur de soufre. Or, les expériences de Dumas concernant le poids de la vapeur de soufre, directement

observée, attribuent à ce demi-volume le poids 48, alors que, d'après la densité du gaz sulfhydrique, ce poids n'est que 16; l'atome libre est donc plus condensé que l'atome combiné. Le phosphore et l'arsenic présentent une particularité analogue.

Si ces perturbations s'expliquent à la rigueur par le fait d'une action chimique plus énergique que l'action calorifique, il en est autrement pour le mercure. Des analogies de ce métal, on avait conclu au poids 200 pour son demi-atome, tandis que Dumas constatait que le demi-volume de sa vapeur pesait 100. Contrairement aux cas précédents, « la chaleur divisait donc les particules de ce métal plus que l'action chimique »; aussi Dumas concluait-il : « Si j'en étais le maître, j'effacerais le mot atome de la science, persuadé qu'il va plus loin que l'expérience, et jamais, en chimie, nous ne devons aller plus loin que l'expérience. »

Ainsi, resté seul pendant six années à défendre sa conception contre tous ses contemporains, comme le dit Ladenburg dans son *Histoire de la chimie*, il abandonna l'hypothèse atomique devant l'impossibilité de trouver une définition expérimentale de l'atome.

Malgré tout, l'idée était lancée. Exactement traduite par un modeste calculateur, Marc-Antoine Gaudin, elle allait prendre la forme qui nous est aujourd'hui familière.

Deux mémoires sur l'architecture des atomes présentés à l'Académie des sciences en 1832 furent favorablement appréciés par les deux commissaires délégués : Becquerel et Gay-Lussac. Ils apparurent comme une simplification des idées d'Ampère sur la constitution des molécules. En voici les passages les plus importants extraits par Grimaux du Mémoire publié par Gaudin dans les *Annales de chimie et de physique* en 1833 :

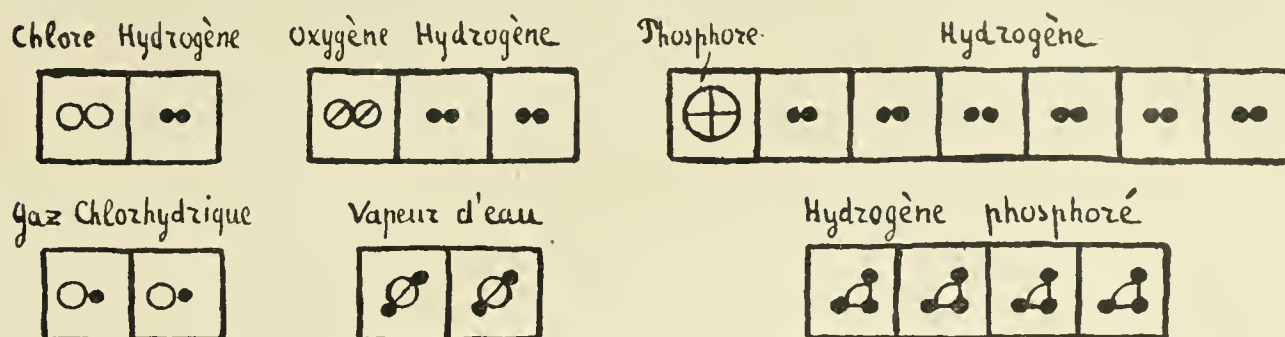
Pour rendre le langage plus précis..., nous établirons, dit Gaudin, une distinction bien tranchée entre les mots *atome* et *molécule*, et cela avec d'autant plus de raison que si on n'est pas parvenu aux mêmes conclusions que moi, c'est uniquement faute d'avoir établi cette distinction.

Un atome sera pour nous un petit corps sphéroïde homogène, un point matériel essentiellement indivisible; tandis que la molécule sera un groupe isolé d'atomes en nombre quelconque.

Nous appellerons biatomique, triatomique, etc., la molécule composée de deux, trois atomes, etc.

A la même pression et à la même température, les molécules sont à la même distance... D'autre part, une molécule de gaz hydrogène, en se combinant avec une molécule de chlore, donne deux molécules de gaz hydrochlorique. Pour que la combinaison se fasse et que les molécules composées observent la même distance que celle des composants, il faut et il suffit que chaque molécule composante se divise en deux. Ce sont ces moitiés que nous tiendrons pour atomes, de sorte que les molécules hydrogène, chlore, acide hydrochlorique sont biatomiques, au moins.

Gaudin donnait les figures suivantes pour imager son idée



et, discutant le cas de la densité de vapeur du mercure, il ajoutait :

La densité de vapeur du mercure rapportée à l'oxygène est 6,321. Or, nous comparons une molécule de mercure à une molécule biatomique d'oxygène ; mais si nous rapportons le poids de la molécule de mercure à l'atome d'oxygène, il serait le double, soit 12,642. Or, ce nombre est le poids atomique adopté par tous les chimistes. Donc la vapeur de mercure est monoatomique, donc ses particules sont des atomes.

Il est impossible d'être plus clair, et l'on connaît les sanctions qu'ont apportées aux affirmations de Gaudin la théorie de Clausius et les expériences de Kundt et Warburg.

Ainsi en prenant l'atome d'hydrogène pour unité de poids, sa molécule pèse 2, et toute molécule P pèse le double de sa densité gazeuse D par rapport à ce gaz.

Indépendante de l'atomicité, qui mesure la condensation des éléments en rapport avec leur densité gazeuse et avec la loi de Faraday, la valence d'un atome mesure sa capacité pour l'hydrogène ; elle est égale à 1 pour le chlore, le brome, l'iode, à 2 pour l'oxygène et le soufre, à 3 pour l'azote, le phosphore et l'arsenic... C'est ce qu'expriment les formules ClH , OH^2 , NH^3 , PH^3 , etc. Le composé CH^4 n'a été isolé qu'en 1837 par Persoz.

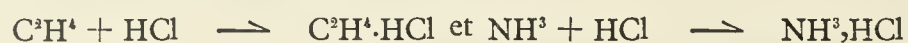
Si l'on avait porté plus d'attention à ce limpide exposé, la chimie eût été avancée de cinquante ans, et la constitution des corps eût immédiatement apparu dans sa forme actuelle par l'application de la formule $P = 2D_H$. Mais un silence complet se fit sur ce travail, et, pour retrouver les résultats qu'il renfermait, il fallut, comme on le verra plus loin, l'action combinée de Laurent et de Gerhardt.

2^o Fonctions chimiques. — Alcools.

Cependant une autre conception capitale de Dumas, celle des fonctions chimiques, se développait dans le Mémoire, publié en 1835, concernant l'alcool méthyl-

lique. Dans cette œuvre des plus suggestives, Dumas, non plus que Lavoisier, ne prit pour objectif immédiat la découverte de corps nouveaux. Sans doute ceux-ci sont indispensables à l'édification de la chimie ; mais, au lieu d'attendre leur connaissance de l'empirisme et de tâtonnements non coordonnés, Dumas se proposa de trouver des lois aptes à la recherche et à la préparation méthodique de ces composés. C'est en somme une science qu'il veut édifier de toutes pièces, et le travail entrepris avec Péligot lui fournit un moyen d'aboutir à cet audacieux résultat. Voici en effet la conclusion de ce travail : « Il est clair que M. Taylor a parfaitement connu l'esprit de bois, que d'autres chimistes venus après lui n'ont rien ajouté à son histoire... Personne n'y a vu un nouvel alcool formé à la façon de l'alcool commun et rattaché à un nouveau radical. Personne n'a établi qu'entre ces deux corps il existe des relations comme celles que l'on observe en chimie minérale entre la soude et la potasse. Cette base de notre travail nous paraît véritablement nouvelle. »

La netteté de cette revendication éclaire les conceptions de Dumas. Dans un travail antérieur, fait en collaboration avec Boullay fils, il avait admis que les éthers composés de l'alcool étaient comparables aux sels minéraux ; puis, empruntant les données fournies par une importante publication de Boullay père, il admettait que l'éther ordinaire, produit de la déshydratation de l'alcool, formait l'oxyde basique de ces pseudo-sels. Il était dès lors peu probable que l'alcool fût un corps isolé, seul de son espèce. D'autre part, Robiquet et Colin ayant établi l'identité de l'éther chlorhydrique avec la combinaison de l'éthylène et du gaz chlorhydrique, Dumas fut conduit à comparer les combinaisons :



et à admettre que dans les éthers, et par suite dans l'alcool commun, le carbone provient en totalité d'un radical C^2H^4 à tendances basiques : l'éthérène ou éthylène.

Ayant observé les mêmes réactions sur l'alcool méthylique ou esprit de bois, il affirmait que cette similitude obligeait à supposer que l'alcool méthylique se relie aussi à un hydrogène carboné, « le plus simple de tous » et qu'il appelle méthylène sans cependant l'avoir isolé.

D'autre part, le noir de platine convertit, au contact de l'air, l'alcool méthylique en acide formique par fixation d'une quantité d'oxygène équivalente à celle de l'hydrogène perdu, mécanisme qui se retrouve identiquement dans la transformation de l'alcool commun en acide acétique. C'est ce parallélisme qui, rapporté aux équiva-

lents $C = 6$ et $O = 8$, est indiqué dans le tableau suivant, transcrit dans le Mémoire de Dumas et Péligot, où figure encore l'alcool cétylique du spermaceti.

	RADICAUX	ÉTHERS	ALCOOLS	OXALATES	ACIDES
Ethylique...	C^4H^4	C^4H^3O	$C^4H^5O.HO$	$C^4H^5O.C^2O^3$	$C^4H^4O^4$
Méthylique.	C^2H^2	C^2H^3O	$C^2H^3O.HO$	$C^2H^3O.C^2O^3$	$C^2H^2O^4$

On y voit poindre les fonctions carbure, éther, alcool, éther composé et acide, que Gerhardt précisera plus tard. Mais il convenait d'abord de poursuivre la recherche des alcools, dont l'importance équivalait à la découverte de métaux nouveaux en chimie minérale. Les produits de fermentation ont fourni aux élèves de Dumas le terrain le plus propre à ces explorations. Cahours trouvera l'alcool amylique dans l'huile de pommes de terre, en 1839 ; Wurtz, l'alcool butylique dans les résidus de fermentation de la betterave ; Chancel retirera l'alcool propylique du marc de raisin, tandis que Canizarro (Italien) obtiendra l'alcool benzylique par une méthode chimique dont son compatriote Piria avait indiqué le principe.

3° Hypothèse des radicaux.

On a vu au début de cette *Histoire de la chimie* (page 423), que le succès de la théorie du phlogistique avait eu pour cause l'affirmation constante que « l'expérience seule relie, affermit et démontre une déduction et une connexion ». Cette manière de voir, généralement adoptée par les chimistes de toutes les époques, H. Poincaré, dans son *Rapport sur le congrès de Physique en 1900*, l'exprime en ces termes : « L'expérience est la source unique de la vérité. Elle seule peut nous apprendre quelque chose de nouveau ; elle seule peut nous donner la certitude. » En dépit de la haute autorité de l'illustre mathématicien, il semble plutôt que, si l'expérience est le plus sûr contrôle de la vérité, elle n'en est cependant pas la source unique. Dalton, en partant d'une idée purement philosophique, est arrivé à des conséquences incalculables, et, « pour n'avoir pas voulu aller plus loin que l'expérience », Dumas a diminué son œuvre personnelle. La conception des radicaux est une autre preuve que l'hypothèse reste féconde sous le contrôle de l'expérience qu'elle suggère.

Dans son *Traité de chimie*, Lavoisier supposait que les acides organiques sont dus à la combinaison de l'oxygène avec un radical composé de carbone et d'hydro-

gène parfois associés à l'azote ; Berzélius, son continuateur, précisa et généralisa cette conception. Ce fut lui qui donna le nom d'ammonium au composé hypothétique NH^4 qui, d'après la théorie d'Ampère, fonctionne comme métal dans les sels ammoniacaux : (NH^4) , Cl devenant analogue à KCl, chlorure de potassium. Devant l'impossibilité d'isoler les radicaux, la plupart des chimistes hésitaient à admettre ces groupements atomiques imaginaires, quand Gay-Lussac isola un composé d'azote N et de carbone C, le cyanogène CN, dont il établit l'analogie complète avec le chlore Cl. L'existence de composés susceptibles de se comporter comme des corps simples constitutifs des molécules était donc établie ; elle fut étendue aux ferrocyanures par Gay-Lussac. Ces découvertes, faites en 1814, ont laissé dans la science une empreinte ineffaçable.

Nous venons de voir avec quelle perspicacité Dumas et Péligot avaient adapté ce genre de radicaux aux alcools. Avec l'éthylène, le cyanogène et les ferrocyanures, il semblait que l'on demeurât dans les limites de l'expérience ; pourtant on ne connaît pas encore l'homologue inférieur de l'éthylène, le radical CH^2 admis par Dumas. D'autre part, Berzélius, tout en assimilant les éthers aux sels formés par l'union des acides anhydres avec l'éther ordinaire $(\text{C}^4 \text{H}^5 \Theta)$ ($\text{C} = 6$, $\Theta = 8$), admettait dans l'éther l'existence d'un radical hypothétique, l'*éthyle* $(\text{C}^4 \text{H}^5)$, comparable à l'*ammonium* (NH^4) d'Ampère et au potassium K. Enfin dans un Mémoire fait en commun avec Wœhler, Liebig, ayant observé que tous les composés benzoïques renferment un groupe ternaire $\text{C}^7 \text{H}^5 \text{O}$, le considéra sans hésitation, quoique non isolé, comme le radical caractéristique de cette série de composés : acide benzoïque, essence d'amandes amères, etc. Cependant, en 1837, l'accord parut se faire, car Dumas et Liebig publièrent en collaboration, aux comptes-rendus de l'Académie des sciences, une note dont voici la conclusion :

« La chimie organique présente des radicaux qui jouent le même rôle que les métaux ou les métalloïdes. Ces radicaux se combinant entre eux ou avec les corps simples donnent naissance à toutes les combinaisons organiques... La chimie organique se résume donc dans la recherche de ces radicaux et de leurs propriétés. »

Au fond, Dumas et Liebig ne s'entendaient pas sur la définition des radicaux. Dumas, persuadé qu'on devait rester dans les limites de l'expérience, les voulait réels, isolables, comme le cyanogène ; Liebig tenait pour les radicaux hypothétiques, dont l'ammonium était le prototype et le benzoïle un modèle.

Par une singulière ironie des faits, tandis que Bunsen, disciple de Liebig, retirait le cacodyle à l'état de liberté des dérivés arsénicaux de Cadet, — et son Mémoire de 1843 est encore considéré en Allemagne comme le couronnement de la théorie

des radicaux, — les élèves de Dumas accumulaient les radicaux hydrocarbonés et acides, tous hypothétiques. Entre la formule dualistique $C^2 H^4 HCl$, adoptée par Dumas, et la formule correspondante $C^2 H^5 Cl$ admise par Berzélius et généralisée par Liebig et Wœhler, la différence est légère et semble se ramener à une simple question de forme. En réalité, les deux systèmes répondent à deux directions scientifiques qu'aujourd'hui seulement nous apercevons nettement. La conception hypothétique d'Ampère, Liebig et Berzélius prit son importance à la suite de la découverte des *substitutions*; celle de Gay-Lussac et Dumas ne se développa que bien plus tard, par l'étude des *complexes*, véritable retour au *dualisme*.

4° Substitutions.

La découverte des substitutions (1834) est certainement la conception la plus féconde de la chimie, puisqu'elle a donné la possibilité d'obtenir les corps en nombre indéfini. Gay-Lussac, en 1815, avait trouvé que le chlore est susceptible de remplacer l'hydrogène volume à volume dans certaines matières organiques. Il vit dans ce fait une nouvelle confirmation de sa loi chimique des volumes.

Dumas, qui venait d'établir la composition du chloroforme découvert par Soubeyran en 1831, et qui étudiait (1834-1835) l'action du chlore sur l'alcool, observa le même fait; mais il y vit l'indication d'un puissant mécanisme chimique. « Ce singulier pouvoir du chlore de s'emparer de l'hydrogène de certains corps et de le remplacer atome à atome, dit-il, est une loi de la nature. Cette loi ou théorie des substitutions mérite un nom particulier. Je propose celui de *métalepsie*. » Il ajoute que la règle relative à l'action du chlore s'applique certainement à tous les corps capables de réagir comme déshydrogénants. Il explique la transformation de l'alcool en acide acétique par la substitution d'un demi-atome d'oxygène à chaque atome d'hydrogène disparu dans le carbure générateur.

Laurent qui, à la même époque, constatait la substitution du chlore à l'hydrogène de la naphthaline, donna de ce fait une autre interprétation non moins originale, développée dans sa thèse de doctorat (1837). Ayant observé que le chlore, introduit par substitution, n'altère pas le noyau de la naphthaline, il conçut l'idée féconde de l'architecture moléculaire, à laquelle, par l'étude des dérivés chlorés du méthane et de l'acide acétique, Dumas apporta plus tard un appui frappant. L'acide trichloracétique, dans lequel il avait introduit trois atomes de chlore à la

place de trois atomes d'hydrogène, conservait sa propriété essentielle : sa qualité d'acide monobasique. L'édifice moléculaire initial n'avait donc pas été bouleversé.

Or Berzélius, resté fidèle à la théorie dualistique des bases et des acides de Lavoisier, qu'il appuyait en outre sur l'électrolyse des sels, ne pouvait admettre que des éléments de polarité contraire, comme le chlore et l'hydrogène, se substituassent l'un à l'autre, alors que l'attraction des éléments électronégatifs par les éléments électropositifs devait nécessairement provoquer leur combinaison. Les plus illustres maîtres de la chimie en Allemagne se ralliaient à cette opinion de Berzélius, et étaient si éloignés de la conception de Laurent qu'ils la tournaient en dérision. Liebig faisait paraître dans ses *Annales* une lettre soi-disant écrite par un professeur de Paris. Ce correspondant lui signalait que dans l'action décolorante du chlore « les étoffes blanchies en Angleterre, d'après la loi des substitutions, conservaient leur type..., et qu'il existait déjà dans les magasins de Londres des étoffes en chlore filé, très recherchées dans les hôpitaux et préférées à toutes autres pour bonnets de nuit, caleçons, etc. ». L'auteur de cette lettre revendiquait la substitution du carbone par le chlore et signait : S. C. H. Windler. Cette lettre ne suggéra à Wœhler qu'un seul regret : celui que le terme Schwindler n'eût pas été compris par les Français : « Tu aurais dû, écrivait-il à Liebig, la signer d'un nom français, par exemple : Charlatan ou professeur Ch. Arlatan. »

Cette attitude des savants étrangers parut influencer Dumas. Il désavoua l'idée de structure moléculaire, quoique Malaguti et Melsens, ses élèves, eussent prouvé que les éthers chlorés restent des éthers, et que la substitution inverse de l'hydrogène au chlore restaure le carbure typique.

On a vu que Liebig était revenu à une appréciation plus digne de lui ; et voici ce que Hofmann, son élève préféré, écrivait en 1880 : « Toutes les fois que nous examinons la longue série des corps reliés les uns aux autres, la manière la plus simple d'envisager les transitions est de les considérer comme des produits de substitution. »

Toutefois, on ne doit pas omettre que les substitutions s'appliquent aux molécules, et qu'elles sont réglées par la capacité des éléments ou des radicaux pour l'hydrogène ; c'est-à-dire qu'elles demeurent sous la dépendance des deux principes fondamentaux énoncés par Dumas en 1826 et 1828.

PROSCRIPTION
DES ATOMES Dans sa *Philosophie chimique* de 1836, Dumas, devenu l'adversaire irréductible de l'hypothèse atomique, faisait remarquer « aux jeunes chimistes accoutumés à accepter un langage tout fait et

des formules courantes, que les nombres proportionnels établis par les Allemands Wenzel et Richter sur la neutralité qui rend toujours comparables des acides, des bases et des sels, sont seuls l'expression de l'expérience. Au contraire, dans la comparaison des corps simples, on ne connaît aucune propriété qui établisse la proportionnalité de l'équivalence. On ignore, par exemple, combien il faut de chlore pour remplacer le phosphore, de charbon pour remplacer l'azote ». Telle est, à son avis, la seule différence entre les équivalents et les atomes. Puis, toujours chef d'école, il posait les termes des problèmes à résoudre. Commentant les expériences de Faraday sur la décomposition des sels par une même quantité d'électricité, il remarquait que, si des notions sur la force et l'arrangement des particules matérielles avaient déjà tant appris, on devait encore plus attendre de l'étude des rapports des particules avec la chaleur et l'électricité qui président à toutes les opérations de la chimie. Frappé de ce que dix ans avaient suffi à Lavoisier et à Davy pour imposer leurs idées, alors que l'Europe entière repoussait les siennes, il s'inclinait devant cette résistance; mais apercevant dans l'idée de Prout « que tous les poids atomiques sont des multiples entiers de celui de l'hydrogène », une présomption en faveur de l'unité de la matière, il entreprit ses recherches de haute précision sur la valeur exacte des équivalents de l'hydrogène, de l'oxygène et du carbone, faites en collaboration avec Boussingault et Stas. Les chiffres trouvés, 1, 8, 6, étaient en effet des nombres entiers dont Dumas tira des rapprochements où l'on constate le désir de prouver la possibilité, subordonnée toutefois aux analogies chimiques, de réduire le nombre des corps simples :

FAMILLE DE L'OXYGÈNE	MÉTAUX ALCALINS	MÉTAUX ALCALINS TERREUX
Oxygène O = 16	Lithium L = 7	Magnésium 24
Soufre S = 32 soit 16 + 16	Sodium Na = 23 soit 7 + 16	Calcium 40 = 24 + 16
Sélénium Sc = 80 = 16 + 4 × 16	Potassium K = 39 soit 7 + 2 × 16	Strontium 88 = 24 + 4 × 16
Tellure Te = 128 = 16 + 7 × 16	— —	Baryum 136 = 24 + 7 × 16
Caractéristiques 16 + n. 16	— 7 + n. 16	— 24 + n. 16

Les rectifications, relativement récentes, de M. Leduc prouvant que l'hydrogène et l'oxygène ne se combinent pas dans le rapport exact de 1 à 16, ont éloigné les savants français de l'hypothèse de Prout; nous verrons que rien n'arrête les physiciens anglais, aujourd'hui ralliés au principe de l'unité de la matière.

B. — RETOUR AUX ATOMES : NOTIONS DOCTRINALES

LAURENT ET GEHRARDT Revenons à la théorie atomique. Abandonnée de toutes parts, elle ne trouva qu'un défenseur, dont l'ardente conviction et l'abnégation absolue la sauvèrent, elle et ses conséquences : ce fut Laurent. Son caractère égalait son talent ; il n'hésita pas à sacrifier sa carrière, sa tranquillité et jusqu'à ses facilités de travail à la défense des principes qu'il considérait comme fondamentaux : la notion moléculaire et celle d'atome.

Laurent, ancien élève de l'École des mines, possédait une instruction mathématique qui lui faisait repousser comme illogique l'emploi des demi-atomes. Pour lui, c'est un atome N d'azote qui s'unit à 3 atomes H dans NH^3 ; c'est aussi un atome O d'oxygène qui s'unit à 2 atomes H dans OH^2 ; et les deux composés résultants, ammoniaque et eau, occupant le même volume, sont les molécules. Il se rencontre avec Gaudin et accorde les formules avec la capacité de saturation énoncée en 1828. Dumas n'avait pas toujours invariablement appliqué la notion moléculaire tirée de ses déterminations de densités de vapeur ; il admettait, par exemple pour l'acétone et l'éther, des formules que Laurent, inflexible sur ce point capital, n'hésitait pas à doubler. L'omission de ses propres principes est déconcertante ; peut-être Dumas voulait-il respecter à la fois les formules données par Gay-Lussac et les analogies indiquées par Berzélius ; peut-être était-il embarrassé par d'autres difficultés : ainsi l'acide acétique était le type d'une série de corps volatils dont la densité de vapeur répondait à une molécule et demie, alors que ses propriétés chimiques coïncidaient avec la molécule $\text{C}^2\text{H}^4\text{O}^2$. Cahours leva cette difficulté en 1844, montrant que la densité de vapeur de cet acide et de ses semblables diminue avec la température et se fixe rigoureusement à la valeur moléculaire dès que la température dépasse de 100 degrés le point d'ébullition normal. Laurent avait donc raison de s'en tenir absolument à la notion moléculaire, que les travaux de Raoult devaient plus tard étendre aux sucres et aux autres corps solubles impossibles à volatiliser. Mais son intransigeance témoignait d'un grand courage ; car la défaveur des atomistes était générale : Dalton, en 1843, mourait à peu près oublié de ses concitoyens, ramenés par Dumas et Liebig à l'usage des demi-atomes ou équivalents de Gmelin et Wollaston.

Poursuivant rigoureusement ses déductions, Laurent les appuyait sur les ana-

logies et le mécanisme des réactions chimiques. Célèbre par ses belles expériences sur la naphthaline, fondement de sa théorie des noyaux, il convenait avec Dumas que l'alcool renferme des atomes d'hydrogène de provenances et par conséquent de propriétés différentes, les uns issus de l'éthylène, les autres de l'eau ($C^2H^4-H^2O$) ; mais si dans son éther chlorhydrique $C^2H^5.Cl$ et ses autres composés, un seul des atomes d'hydrogène provenant de l'eau est prélevé, c'est que l'autre atome H fait partie intégrante du radical caractéristique de l'alcool qui doit s'écrire $C^2H^5.OH$. L'alcool, ne renfermant plus d'eau disponible, est comparable à la potasse $K.OH$, tandis que l'éther se rapproche de l'oxyde de potassium $K.O.K$.

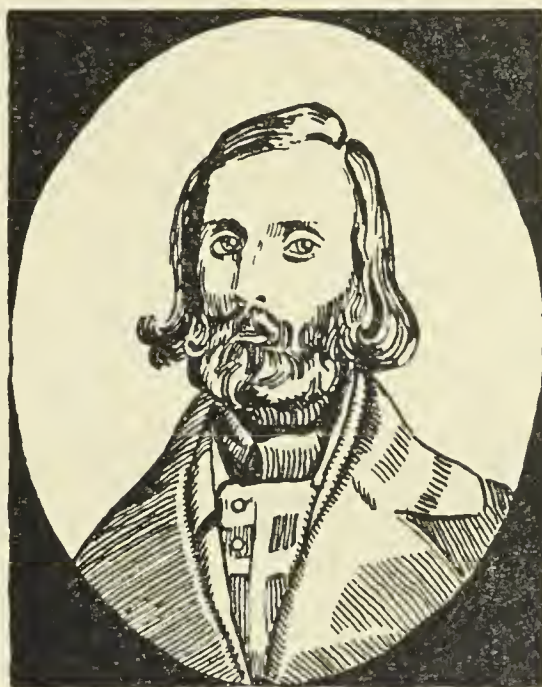
Du fait, signalé par Dumas et Péligot, que toute combinaison organique dérive d'un carbure fondamental, caractérisé par le nombre des équivalents de carbone qu'il renferme, Laurent, dans sa *Théorie des combinaisons chimiques*, tirait, en 1836, cette règle essentielle :

« Si l'on enlève du carbone à la combinaison, celle-ci sort de la série et renferme un nouveau radical. » Puisque l'acide acétique $C^2H^4O^2$, en se transformant en acétone, perd le quart de son carbone, d'après les constatations de Frémy, c'est, concluait-il, que l'acétone n'appartient plus, comme l'acide acétique et comme l'alcool,

à la série de l'hydrogène bicarboné. Il entre dans une série plus riche en carbone, c'est-à-dire qu'il se rapporte à un carbure tel que C^3H^6 ou C^3H^8 . Friedel a vérifié plus tard cette prévision en découvrant l'alcool isopropylique dans l'hydrogénation de l'acétone.

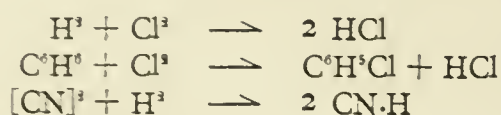
C'est encore dans ce Mémoire que Laurent fait dériver les acides d'une fixation de l'oxygène en dehors du radical, attribuant l'acidité non pas au rapport de l'hydrogène à l'oxygène, mais seulement à la place de ce dernier dans l'hydrocarbure. C'était entrevoir l'existence du groupe fonctionnel acide CO^2H , admise aujourd'hui.

Dans un autre Mémoire publié aux *Annales* de 1846, où il atteste son entente parfaite avec Gerhardt, avec qui il venait de se lier, Laurent examinant les modes de formation bien établis de plusieurs centaines de corps organiques et se basant sur les analogies, l'isomorphisme et la loi de Dulong, en déduit la *loi des nombres*



LAURENT (1807-1853)

pairs. Elle impliquait que ce sont toujours des groupements diatomiques, et non des atomes, qui interviennent dans les réactions ; par exemple « en prenant deux volumes pour tous les corps simples ou composés afin d'éviter les fractions », on trouve :



Ces exemples, triés à dessein, s'étendent aux radicaux composés, tels que le cyanogène, qui, à l'état libre, n'a donc pas la forme simple CN, mais l'état $[\text{CN}]^2$ comparable à Cl^2 . Ce parallélisme est justifié par l'examen des volumes gazeux. De plus toutes ces réactions, qu'on peut considérer comme des substitutions, correspondent sans exception à des doubles décompositions ; aussi Laurent n'hésite pas à conclure, avant Frankland, que le radical éthyle, pas plus que le radical cyanogène, n'existe à l'état libre, car en vertu de sa loi, l'iodure $\text{C}^2\text{H}^5\text{I}$ doit, en se dédoublant, fournir l'iode I^2 (et non pas l'atome I) par une double décomposition qui entraîne une condensation de l'éthyle, analogue à celle du cyanogène.

La prépondérance de la notion moléculaire sur la notion atomique ressort nettement de ce Mémoire. En définissant avec Gerhardt l'atome comme la plus petite quantité susceptible d'entrer dans une combinaison, tandis que la molécule est la plus petite quantité d'un corps simple qu'il faut employer pour opérer une combinaison, l'indivisibilité de l'atome cesse d'être essentielle. Les deux novateurs lui substituent une donnée expérimentale nettement définie par l'hypothèse d'Avogadro et par les conditions opératoires fixées par Cahours pour isoler la molécule.

Chez Laurent, l'habileté expérimentale égalait le don d'invention. Ses expériences sur les dérivés phtaliques, camphoriques, indigotiques, sa découverte des imides, etc., en témoignent. La précision de ses analyses appliquées au mellon sur lequel Liebig avait échafaudé une théorie des radicaux, démontra la présence insoupçonnée de l'hydrogène dans ce composé et, dans ses dérivés chlorés, l'existence d'une quantité de chlore double de celle qu'on admettait. Ni la théorie, ni les corps qu'englobait le mellon ne se relevèrent de ce coup, qui valut à Laurent l'inimitié tenace du célèbre chimiste allemand. Son talent d'expérimentation lui fut donc aussi funeste que son génie intuitif. Il n'en doutait d'ailleurs pas, puisqu'il écrivait à Liebig :

« J'ai toujours rencontré votre haine sur ma route. Il y a huit ans, je demandais une place de préparateur : « Vos travaux sur la naphtaline sont mauvais, me répondit-on, car M. Liebig l'a dit. » Aujourd'hui, qui voudrait me prêter son appui, quand vous me représentez comme un faussaire ? C'est vous qui, couvert d'honneurs,

« gorgé de richesses, c'est vous qui vous abaissez pour la troisième fois à jouer « envers moi le rôle d'un vil calomniateur » (Grimaux : *Ch. Gerhardt*). Il fallut l'intervention de Thénard, Chevreul, Gay-Lussac, Pelouze et Pouillet pour faire nommer Laurent essayeur à la Monnaie en 1848. Ses prédilections théoriques servaient de prétexte à ces persécutions. Mais qu'est-ce qu'une science sans théories ? Et n'était-ce pas Dumas lui-même qui, par sa méthode même, avait suscité ces tendances ? « A la Sorbonne et au Collège de France, Dumas professait avec un éclat incomparable, déduisant les conséquences d'une découverte avec une richesse d'imagination et une abondance de langage qui éblouissaient ses auditeurs » (Grimaux).

GERHARDT.

SES DÉBUTS Gerhardt, élève de Liebig, arrivant à Paris à la fin de l'année 1838, subit cet ascendant : il se compte « au nombre de ceux qui ont eu le bonheur d'assister aux leçons de M. Dumas ». Dès 1840, ce maître l'incite à publier un travail d'ensemble sur la constitution des sels organiques. Comparant la benzine et la nitro-benzine sous le même volume de vapeur, Gerhardt rapproche le résidu NO^2 du radical amide NH^2 de Dumas, tout en observant que la substitution d'un corps simple par un corps composé ne se fait pas par le même mécanisme que les combinaisons salines dans lesquelles un oxyde prend la place d'un autre de même ordre...

Dans une nouvelle publication en collaboration avec Cahours apparaît l'emploi des *types mécaniques* de Dumas, qui provoque l'irritation de Berzélius : « La théorie des types, écrivait le savant suédois, est le produit d'une intelligence bornée et de l'insolence qui souvent se suivent de près. » Gerhardt riposte en contestant les équi-



GERHARDT (1816-1856)

valents de Berzélius, et maintient que, dans le cas incriminé, « seule la théorie des types de M. Dumas est admissible ».

SA DÉFINITION DE L'ATOME

Ainsi lancé dans les considérations théoriques, sa personnalité se développe. En 1841, professeur à Montpellier, il reprend ses spéculations théoriques et, à la fin de l'année 1842, il les expose à l'Académie des sciences avec une audace qui faillit lui coûter sa chaire de professeur. C'est à cette date que, divisible ou non, il considère l'atome « comme la plus petite quantité d'un corps simple susceptible d'entrer en combinaison ». Il tire en effet la valeur des poids atomiques du tableau des poids moléculaires de tous les composés qui renferment le corps simple envisagé, subordonnant ainsi l'atome à la molécule. Il montre que les poids atomiques évalués par ce procédé s'ajustent non seulement aux analogies exigées par Berzélius, mais en outre à l'interprétation irréprochable du mécanisme des réactions. Il constate, par exemple, que, dans toute réaction moléculaire (où $P = 2 DH$), la plus petite quantité d'eau mise en liberté est un multiple entier de 18, et que la plus petite quantité de gaz carbonique libéré est un multiple de 44 et non de 22. La molécule d'eau renferme donc au minimum 16 d'oxygène et celle de l'acide carbonique 12 de carbone. Ces nombres sont, conclut Gerhardt, les poids atomiques de ces éléments.

Avant l'Anglais Williamson, il affirme que la formation de l'éther ordinaire par la déshydratation de l'alcool exige l'intervention de deux molécules de ce corps pour former l'eau éliminée, de sorte que la molécule d'éther a pour composition : $C^4H^{10}O$; car $2 C^2H^6O \longrightarrow H^2O + (C^2H^5)^2O$.

De même l'acide acétique ne peut pas être un composé d'eau, un acétate d'eau, parce que les acétates résulteraient du remplacement d'une molécule d'eau ($H^2O = 18$) par une molécule d'oxyde MO , et contiendraient autant d'atomes d'hydrogène que d'atomes de carbone C^2H^2OMO , alors que les acétates renferment ces éléments dans la proportion C^2H^3 . Aussi, ajoute-t-il, les acides monobasiques n'ont pas d'anhydride, tandis que les acides bibasiques qui renferment les éléments H^2O de l'eau se déshydratent, comme Bussy l'a prouvé en isolant SO^3 . A cette date 1842-1843, Gerhardt, adepte de la théorie des types de Dumas, précise ses conceptions par des formules analogues à celles de Laurent. Elles sont devenues les nôtres, et relient la chimie organique à la chimie minérale. En voici des extraits :

Acide acétique.....	$C^2H^3O^3.H$	Acétate d'argent.....	$C^2H^3O^3Ag$
Acide chloracétique	$C^2Cl^3O^3.H$	Chloracétate d'argent	$C^2Cl^3O^3.Ag$
Acide nitrique	$NO^3.H$	Nitrate de potasse.....	NO^3K
Acide sulfurique	$SO^4.H^2$	Sulfate de potasse.....	$SO^4.K^2$

Ainsi, par ces chemins détournés, Gerhardt arrivait, lui aussi, à des conclusions auxquelles la rigoureuse interprétation des principes énoncés dans les Mémoires de 1826-1828 aurait immédiatement conduit. Poursuivant l'œuvre collective, il va :

- 1^o Mettre au point la notion d'homologie ;
- 2^o Reviser la théorie des types ;
- 3^o Étendre aux radicaux la théorie des substitutions.

Imagée par les schémas dessinés au début de l'histoire de l'école atomistique, cette œuvre, si abstraite en apparence, groupe un nombre incalculable de faits suggérant aux chercheurs des expériences en nombre illimité ; elle a fait de la chimie organique, inexistante au début du dix-neuvième siècle, la source intarissable de composés insoupçonnés, dont l'utilisation s'affirme rapidement et détermine la création d'industries importantes et variées.

1^o Homologie.

Si Dumas avait renoncé à la théorie atomique, son génie créateur restait en éveil. En 1842, poursuivant ses tentatives de classification, capitales à ses yeux, il venait de découvrir la série des acides qui, entre l'acide formique et ceux que Chevreul avait retirés des graisses, s'évalent régulièrement, différant terme à terme, par un atome de carbone et deux atomes d'hydrogène. Cette différence, indice d'une similitude chimique, se retrouve dans les alcools puisqu'ils avaient été rattachés aux acides par substitution d'un atome d'oxygène à deux atomes d'hydrogène. Comme tout acide, en perdant une molécule carbonique CO², engendre un carbure, la même observation s'applique à ces carbures. Vivement perçues par Gerhardt, ces généralisations lui suggérèrent l'idée d'une admirable classification des composés organiques de la série grasse ou paraffinique, résumée dans le *tableau d'homologie* que voici :

CH ⁴	C ² H ⁶	C ³ H ⁸	C ⁿ H ²ⁿ⁺²
CH ² O ³	C ² H ⁴ O ³	C ³ H ⁶ O ²	C ⁿ H ²ⁿ O ²
CH ⁴ O	C ² H ⁶ O	C ³ H ⁸ O	C ⁿ H ²ⁿ⁺¹ O ¹
CH ⁵ N	C ² H ⁷ N	C ³ H ⁹ N	C ⁿ H ²ⁿ⁺¹ N ³
—	—	—	—

Ce tableau lui-même illustre cette célèbre comparaison de Gerhardt : « Si on dispose sur une table un jeu de cartes en mettant sur une première ligne verticale toutes les cartes d'une même couleur et parallèlement à celles-ci, sur d'autres lignes

verticales, les cartes semblables des autres couleurs, les cartes de même couleur mais de valeur différente, placées dans le sens vertical, formeront une série hétérologue ; les cartes de couleurs différentes mais de même valeur, disposées horizontalement, formeront une série isologue ou homologue. Enlevons une carte du jeu ainsi classé, d'après le caractère des voisines, nous déterminerons d'avance les propriétés de celle qui manque. »

Ce genre de table à double entrée se retrouve dans la classification des éléments par Mendelejeff, qui fit et fait encore tant de bruit.

Pour montrer toute la valeur de celle de Gerhardt, mettons en évidence, dans chaque composé, les radicaux hydrocarbonés monovalents : H , CH^3 , C^2H^5 , etc. Le tableau prend alors la forme suivante :

$CH^3.H$	$C^2H^5.H$	$C^3H^7.H$	$C^nH^{2n+1}.H$	$H.H$
$CH^3.Cl$	$C^2H^5.Cl$	$C^3H^7.Cl$	$C^nH^{2n+1}.Cl$	$H.Cl$
$CH^3.OH$	$C^2H^5.OH$	$C^3H^7.OH$	$C^nH^{2n+1}.OH$	$H.OH$
$CH^3.NH^2$	$C^2H^5.NH^2$	$C^3H^7.NH^2$	$C^nH^{2n+1}.NH^2$	$H.NH^2$

On en tire cet énoncé frappant de l'idée primordiale indiquée par Dumas dans l'étude de l'esprit de bois, généralisée par Gerhardt :

Tout composé organique dérive d'un carbure typique par substitution de radicaux fonctionnels à l'hydrogène de ce carbure qui, dans la série grasse, est homologue de CH^4 .

2^o Théorie des types.

Il y a plus. Si, dans les formules inscrites sous celle du carbure $CH^3.H$, on retranche le terme constant CH^2 (2^e tableau), tous les composés organiques se trouvent rattachés aux types : $H.H$, $H.Cl$, H^2O , $N.H^3$ de la classification des métalloïdes par Dumas. Ceux-ci prennent dès lors la place des types chimiques mécaniques imaginés par ce maître et dont la durée fut éphémère. Ce retour aux symboles initiaux mettait en lumière le rôle de la valence dans la structure des molécules dont elle indiquait la formule logique. Pour un élément

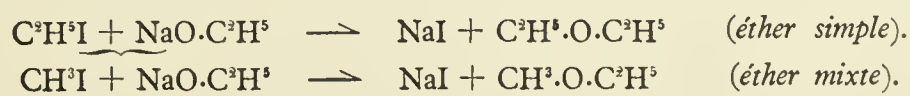
trivalent NH^3 , ou mieux $N \begin{array}{c} | \\ H \\ | \\ H \end{array}$ cette triple capacité réapparaît dans tous ses composés quand on remplace H par un radical monovalent R' , marquant

ainsi la similitude typique ; par exemple, les corps suivants sont tous ammoniacaux :



Le premier ne fut trouvé qu'en 1865 ; le second par Wurtz en 1848 ; quant aux dernières formes, elles furent réalisées par la découverte des amides tertiaires de Gerhardt et Chiozza et ensuite par les amines d'Hofmann.

Pour rapprocher de l'eau H.O.H les éthers R'O.R' assimilables à l'oxyde K.O.K, Williamson, qui avait habité Paris et fréquenté les savants français, apporta, en 1851, un appui décisif. Il fournit la preuve expérimentale que la formation de l'éther ordinaire nécessite l'intervention de deux molécules d'alcool, puisqu'elle résulte de la réaction de l'iodure d'éthyle sur l'alcool sodé : de sorte que, suivant la nature de celui-ci ou suivant celle de l'iodure, on obtient des éthers simples ou mixtes :

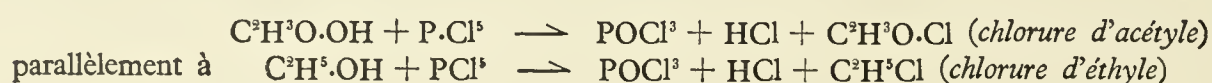


3° Extension des substitutions.

Anhydrides d'acides monobasiques. — Toutes les parties essentielles de l'édifice moléculaire semblaient donc rétablies et élargies, quand H. Sainte-Claire Deville découvrit l'anhydride azotique en chauffant le nitrate d'argent dans un courant de chlore (1849). Cette belle expérience, admirée sans réserve par Dumas, parut apporter la preuve que l'acide azotique pouvait être envisagé comme un azotate d'eau. Sa molécule NO³H ne renfermant qu'un atome d'hydrogène, il fallait admettre l'existence de demi-atomes d'oxygène Θ = 8 ; il fallait, autrement dit, substituer les équivalents aux atomes et donner à l'acide azotique la forme NΘ⁵,HΘ. On ne saura jamais à quel point cette interprétation fut néfaste à l'enseignement et au développement de la chimie organique en France. Gerhardt, il est vrai, avait été trop loin en proclamant l'impossibilité de déshydrater les acides monobasiques, mais admettre l'existence de particules

telles que $H\Theta$, c'était supprimer à la fois l'hypothèse atomique et la notion moléculaire — avec ses conséquences — puisque la particule $H\Theta = 9$ occupe un volume deux fois moindre que les particules d'acide chlorhydrique et d'ammoniaque non modifiées. Déjà cette conception était en opposition avec les expériences de Williamson qui sanctionnaient les idées de Laurent et Gerhardt sur la constitution de l'alcool, ci-dessus indiquées, quand Gerhardt, par des expériences applicables à tous les acides monobasiques, prouva que dans ces composés comme dans les alcools, l'eau existe à l'état résiduel OH : l'acide acétique, par exemple, devenu $C^2H^3O.OH$, contient un radical *acyle* C^2H^3O , comparable aux alkyles et caractéristique des acides monobasiques correspondants *par l'oxygène qu'il contient*.

Pour rapprocher de l'éthyle ce radical inconnu C^2H^3O , Gerhardt eut recours à des réactions d'un parallélisme frappant. Faisant usage des propriétés du chlorure de phosphore préconisé par Cahours, il obtenait :



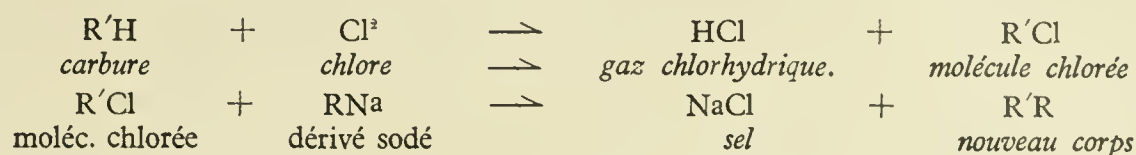
Du chlorure d'acétyle il passait à l'anhydride par l'intervention d'une autre molécule acétique, comme Williamson avait passé de l'iodure d'éthyle à l'éther : $C^2H^3OCl + NaC^2H^3O^2 \longrightarrow NaCl + C^2H^3O.O.C^2H^3O$ (*oxyde d'acétyle*).

Si cette réaction était analogue à celle qui avait produit l'oxyde d'éthyle $C^2H^5O - C^2H^5$, elle possédait sur celle de Williamson l'avantage d'établir expérimentalement qu'un radical n'est point caractéristique d'un corps défini ni de sa fonction, puisque l'acide acétique renferme soit un radical $C^2H^3O^2$, uni à l'atome H auquel se substituent les métaux dans la théorie unitaire de Davy et de Dulong, soit un radical C^2H^3O uni à un résidu OH , susceptible d'être équilibré par tout autre radical monovalent Cl ou NH^2 , comme le prouvaient l'existence du chlorure d'acétyle et la synthèse des amides par Gerhardt.

CONCEPTION GÉNÉRALE DES RADICAUX

La définition et l'emploi des radicaux composés ressortent nettement des expériences de Gerhardt ; toute molécule dont on détache un atome d'hydrogène ou un groupe monovalent quelconque, donne naissance à un radical monovalent R' , qui s'unit aussitôt à

tout autre radical semblable R' ; de sorte que la nouvelle molécule R'R' résultera d'une double décomposition telle que :



De même un radical bivalent R'' se formera en retranchant à une molécule définie deux atomes d'hydrogène ou un groupe bivalent ; et réciproquement ce radical engendrera une nouvelle molécule par addition d'un radical bivalent NH ou O ou S... ou encore par addition de deux radicaux monovalents qui alors donnent à ces doubles « substitutions par résidus » la forme générale R'R'' R ; de même enfin l'azote N'' ou le radical CH''' sont trivalents, etc. Ces définitions précises éclaircissent et généralisent la conclusion de la note publiée en 1837 par Dumas et Liebig sur l'usage et le rôle des radicaux ; mais leur puissance dépasse toute attente.

C. — ŒUVRE DE WURTZ

INFLUENCE DE WURTZ En effet la conception des composés organiques connue sous le nom de théorie atomique est purement artificielle et, quoique n'empruntant rien à la nature, elle va plus loin qu'elle, car on chercherait en vain le chloroforme, les explosifs et certaines classes de couleurs ou de médicaments dans les extraits naturels. Cette surprenante création de l'esprit humain, un peu largement ébauchée au début de ce chapitre, en assimilant la molécule à un édifice dont les parties essentielles sont les radicaux distribués suivant la valence atomique, montre l'importance de cette donnée, que mesure la capacité maxima des corps simples pour l'hydrogène H=1, choisi comme terme de comparaison. Cette importance est surtout marquée pour le carbone qui existe dans tous les composés organiques et le rôle de Wurtz dans cette question mérite d'être rétabli. Familiarisés aujourd'hui avec ces notions de structure, nous n'en concevons plus la hardiesse. Pourtant Gerhardt qui avait montré que dans tout corps organique le poids minimum de carbone combiné est C=12, et qui connaissait la formule CH⁴ et celle de ses dérivés chlorés, omit ce type tétravalent aujourd'hui prédominant. Peut-être qu'une mort prématurée ne lui laissa pas le temps d'apercevoir le lien qui existe entre les carbures gras et les carbures aromatiques si différents et si variés. En tout

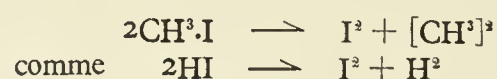
cas la découverte des carbures mixtes par Wurtz vint éclairer les voies détournées par lesquelles on dut passer pour aboutir au type tétravalent. Exposons la question.

En 1849, l'Anglais Frankland et l'Allemand Kolbe découvraient les composés organo-métalliques tels que ZnR^2 comparable au chlorure de zinc ZnCl^2 ; mais



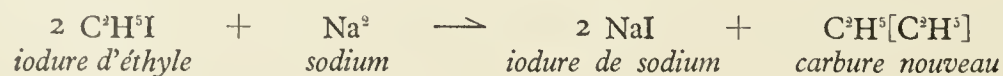
WURTZ (1817-1884)

ces chimistes n'avaient pas, comme ils le croyaient, isolé les radicaux alkyles à l'état libre. Laurent en donnait les causes : si l'on représente par H^2 la molécule d'hydrogène libre, il s'ensuit que CH^3 , qui équivaut à H dans le méthane $\text{CH}^3.\text{H}$, n'existe pas plus que l'atome H à l'état libre. Il se combine à lui-même, comme H, Cl et I, et l'on doit formuler parallèlement les deux réactions :



Cette prévision, confirmée par de nombreuses expériences, faisait de l'éthane C^2H^6 le résultat de la substitution du méthyle CH^3 à l'hydrogène du méthane. Elle suggéra à Wurtz des expériences capitales touchant la filiation des hydro-

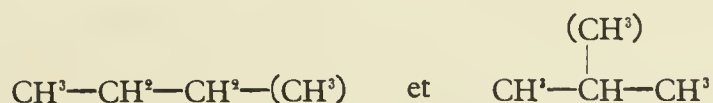
carbures saturés. Élargissant en 1855 ses expériences antérieures, il chauffa avec du sodium de l'iodure $\text{C}^2\text{H}^5\text{I}$, et réalisa sa condensation :



Ce bi-éthyle C^4H^{10} , par sa densité de vapeur et par ses propriétés, se confondait avec le carbure retiré de l'iodure de butyle en substituant l'hydrogène à l'iode par le procédé du Belge Melsens. De même un mélange équimoléculaire des deux iodures $\text{C}^2\text{H}^5\text{I}$ et $\text{C}^4\text{H}^9\text{I}$ donne le carbure C^4H^9 (C^2H^5) par substitution de l'éthyle à H dans le butane C^4H^{10} .

Cette magistrale synthèse de carbures gras laissait entrevoir à Wurtz la filiation de ces corps fondamentaux par substitutions successives du radical méthyle dans le carbure typique, le méthane CH^4 . En conservant la trace et l'ordre de ces opérations, à la manière algébrique, on voit que le deuxième carbure, l'éthane, devient CH^3 (CH^3), ou plus simplement $\text{CH}^3\text{—CH}^3$, si l'on considère que cette substitution résulte de la juxtaposition de deux radicaux monovalents $\text{R}^3\text{R}'$ ou de leur soudure par le carbone, comme l'admit, avant Kékulé, l'Américain Couper, qui travaillait alors dans le laboratoire de Wurtz.

L'iodure d'éthyle $\text{CH}^3\text{—CH}^2\text{—I}$, transformé par $\text{CH}^3\text{—I}$ suivant la méthode de Wurtz, produit ensuite le troisième carbure ou propane $\text{CH}^3\text{—CH}^2\text{—CH}^3$, lequel, à son tour, fournit $\text{CH}^3\text{—CH}^2\text{—CH}^2\text{—CH}^3$, etc., en marquant par des traits d'union les substitutions successives, ou les attaches des radicaux. *Dans l'application de cette règle la considération atomique n'est pas fondamentale : si l'on choisit l'équivalent $\text{€} = 6$, en maintenant la molécule, les formules deviennent $\text{€}^2\text{H}^3$ ($\text{€}^2\text{H}^3$) puis $\text{€}^4\text{H}^5\text{—€}^2\text{H}^3$, où l'on voit €^2 se mouvoir comme C.* Dans tous les cas, il est indispensable de conserver l'ordre des substitutions effectuées. En effet, lorsqu'on arrive au propane $\text{CH}^3\text{—CH}^2\text{—CH}^3$, on voit que la substitution de l'iode à l'hydrogène se fait soit dans un chaînon CH^3 soit dans le chaînon CH^2 , et que les deux dérivés $\text{CH}^3\text{—CH}^2\text{—CH}^2\text{I}$ et $\text{CH}^3\text{—CHI—CH}^3$, constitués par les radicaux différents, séparés par des tirets, donnent des corps aussi dissemblables qu'un chlorure et un azotate, bien qu'ayant même formule globale $\text{C}^3\text{H}^7\text{I}$. En conséquence, la substitution de CH^3 à l'iode donnera aussi deux carbures isomères, mais absolument distincts par leurs radicaux :



Le nombre de ces isomères croît rapidement avec les condensations de carbone, c'est-à-dire avec le nombre des atomes de carbone contenus dans la molécule ; il en résulte que les formules générales C^4H^{10} ou C^5H^{12} du tableau d'homologie de Gerhardt ne représentent plus des carbures uniques, mais les groupes isomériques qui se préparent par la méthode de Wurtz. La portée des formules générales telles que $\text{C}^n\text{H}^{2n+2}$ s'en trouve décuplée. Il en est évidemment de même des autres groupes du tableau d'homologie, acides, alcools, amines... La tétravalence du carbone ne dit rien de plus que ce que Wurtz avait établi par expérience, mais elle est plus commode.

Wurtz fut plus qu'un grand savant. Devenu par la mort prématurée de Gerhardt

le chef incontesté de la nouvelle école, il fut à la hauteur de cette grande mission. Par sa persévérance, par sa fermeté, par l'éclat de son enseignement et le retentissement de ses travaux, il amena le triomphe de la doctrine atomique longtemps pros-
crite et pourchassée dans l'enseignement officiel qui ne voyait dans ces doctrines fécondes qu'un système particulier de nombres proportionnels. Entouré d'une pléiade de disciples dignes de lui, Friedel, Grimaux, Gautier, Lauth, Schutzenberger, Le Bel, le maître fit sentir son action sur toutes les branches de la chimie pure et appliquée. En retenant en France ce patrimoine scientifique incomparable que recueillaient avec avidité les nations étrangères, l'école atomique nous a conservé le moyen de résister victorieusement à la menace de sauvage destruction que laisserait planer sur le monde entier une pénible décision du tribunal de La Haye *légalisant* l'emploi des gaz asphyxiants.

Par ses travaux personnels, Wurtz a montré comment on pouvait tirer du plus pur dogmatisme les meilleurs exemples de réalisations pratiques. Avant sa synthèse des carbures, il s'était illustré par la découverte du procédé d'obtention des amines primaires de forme NH^2R dont l'étude fournit à la création du type NH^3 l'exemple le plus concluant. Ce beau travail, basé sur la décomposition des éthers isocyaniques par un excès de potasse, révélait un maître de la pratique expérimentale ; tandis que la distinction qu'il sut établir entre la basicité et l'atomicité des composés phosphoreux mettait en lumière la finesse de ses méthodes d'invention et d'investigation.

L'ensemble des opérations qui l'ont amené à la découverte des glycols est resté un modèle des procédés de préparation des corps prévus par la théorie. Du laboratoire, ces procédés ont passé dans la pratique : l'éther nitrique du glycol, par exemple, a remplacé pendant la guerre la nitroglycérine dans la fabrication des explosifs et sa chlorhydrine a servi à faire l'ypérite. Ses travaux sur la constitution des alcools polyatomiques, révélée par sa synthèse du glycol et de ses homologues, ouvraient la voie à la conception la plus nette des alcools d'atomicités supérieures et à celles des sucres qui dérivent de ces derniers par une première oxydation.

Disons donc comment, peu après l'établissement par Berthelot de la fonction d'alcool triatomique dans la glycérine, Wurtz tenta d'introduire une double fonction alcool dans l'éthane $\text{CH}^3\text{—CH}^3$, dont la constitution symétrique dénotait la possibilité de reproduire sur le second groupe CH^3 les altérations obtenues sur le premier. Parmi celles-ci la substitution dans C^2H^6 du radical fonctionnel OH à l'hydrogène H avait fourni l'alcool : $\text{CH}^3\text{—OH}$ Répétée sur le second groupe CH^3 , elle

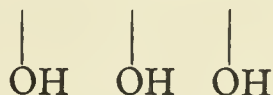


devait donner un bialcool ou glycol $\text{CH}^2\text{—OH}$ dont l'éther bichlorhydrique CH^2Cl

$$\begin{array}{ccc} & | & | \\ & \text{CH}^2\text{—OH} & \text{CH}^2\text{Cl} \end{array}$$

se confond avec l'un des deux éthylènes bichlorés : la liqueur des Hollandais. Par l'intermédiaire de l'acétate d'argent, Wurtz atteignit son but. Aujourd'hui, on y arrive plus simplement en saponifiant directement le bromure $\text{C}^2\text{H}^4\text{Br}^2$ par un excès d'eau alcaline. Ce glycol, assimilé aux bases métalliques telles que $\text{Ca}(\text{OH})^2$ suivant les idées du temps, devait donner un anhydride assimilable à CaO et isomère de l'aldéhyde. Cet anhydride fut isolé effectivement par Wurtz, en même temps qu'il transforma le glycol, par une suite d'oxydations successives, en un aldéhyde-alcool, en acide glycolique, puis en acide oxalique bibasique, etc.

L'hypothèse de types condensés $[\text{H}^2\text{O}]^2$ et $[\text{H}^3\text{O}]^3$ avait fait supposer l'existence d'un radical trivalent C^3H^5 dans la glycérine ; mais comme le propane est constitué par un assemblage de radicaux figuré par la formule $\text{CH}^3\text{—CH}^2\text{—CH}^3$, la glycérine, à l'exemple du glycol, en était le trialcool $\text{CH}^2\text{—CH—CH}^2$ obtenu par l'introduction



du groupe fonctionnel OH dans chacun des chaînons CH^3 et CH^2 . De même la mannite, alcool hexatomique en C^6 caractérisé par Berthelot, doit dériver de la substitution du radical (OH) dans chacun des chaînons de l'hexane ($\text{CH}^3\text{—CH}^2\text{—CH}^2\text{—CH}^2\text{—CH}^2\text{—CH}^3$) d'après ce qui précède. Ces formules attribuées aux alcools polyatomiques sont restées classiques.

La monochlorhydrine du glycol permet en outre de relier par synthèse certaines bases extraites de l'organisme animal comme la névrine, et de l'organisme végétal comme la bétaine de la betterave et la muscarine, poison des champignons, alors que l'origine et les propriétés de ces substances ne laissaient entrevoir aucune similitude entre elles.

Wurtz n'était pas l'homme d'une expérience heureuse. Il estimait fort justement que l'interprétation d'un fait est aussi importante que sa constatation, tandis que sa réalisation relève de la technique. Cette conception de la science se retrouve dans ses recherches sur les acides lactiques et sur la synthèse du phénol.

Quand la mort le frappa dans toute sa force de production, il venait de trouver et de mettre au point une de ces questions que la théorie explique, mais qu'elle ne prévoit pas : celle des *aldols*. C'était un mode de condensation des aldéhydes par contact avec l'acide chlorhydrique. Ces composés passent alors de la série en C^n à la série en C^{2n} , c'est-à-dire qu'ils doublent leur molécule, ajoutant la fonction alcool

à la fonction aldéhydique ; d'où le nom d'aldols, abréviation d'aldéhyde-alcool qu'il donna à ce résultat synthétique. Ce procédé de réalisation d'une rare fécondité se généralisa rapidement et son rôle dans la synthèse des sucres fut capital.

D. — LES EXTENSIONS DE REGNAULT ET DE CAHOURS.

REGNAULT Les fondements de la chimie organique ne sont pas limités au tableau d'homologie propre aux carbures gras (ou paraffiniques), ils s'adaptent aussi bien aux carbures de la forme C^nH^{2n} dont l'éthylène est le type. Dès 1835, l'illustre physicien Regnault, débutant en chimie, avait étendu les phénomènes de substitution à l'éthylène. A cet effet, il partait de la liqueur des Hollandais $C^2H^4Cl^2$. Au contact de la potasse dissoute dans l'alcool, ce chlorure d'éthylène perdait une molécule d'acide chlorhydrique et donnait le composé cherché C^2H^3Cl . Le chlorure désaturé ainsi formé conservait les propriétés caractéristiques du carbure générateur, l'éthylène, en particulier celle de fixer deux atomes monovalents pour retourner à la forme paraffinique C^2X^6 (X étant H ou Cl). Combiné directement à deux atomes de chlore, il produisait le composé $C^2H^3Cl^3$, qui à son tour fournissait sous l'action de la potasse alcoolique le dérivé bichloré de l'éthylène $C^2H^2Cl^2$, également capable de fixer Cl^2 ou Br^2 . En continuant de la même manière, Regnault obtint indirectement la suite des composés C^2H^3Cl , $C^2H^2Cl^2$, C^2HCl^3 et C^2Cl^4 , tous dérivés de C^2H^4 par substitution.

Aussi remarquable que cette extension des phénomènes de substitution est l'emploi récent de ces dérivés dans la grande industrie chimique de l'indigo synthétique, en d'autres termes l'utilisation industrielle de composés qui ne semblaient être que des curiosités scientifiques.

Bientôt le beau travail de Cahours sur les dérivés allyliques compléta la découverte de Regnault et démontra l'adaptation des groupes fonctionnels aux carbures non saturés. La glycérine, chauffée avec l'iodure de phosphore, donne l'iodure d'allyle C^3H^5I , produit de substitution d'un carbure non saturé, l'allylène, C^3H^6 , homologue de l'éthylène. Par transformation de cet iodure en alcool allylique C^3H^5-OH et en amine $NH^2-C^3H^5$, Cahours étendit aux carbures non saturés les règles établies pour les carbures saturés. Passant ensuite, par des oxydations successives de l'alcool allylique à l'aldéhyde, puis à l'acide acrylique correspondant, il prouva que cet alcool non saturé se comporte comme l'alcool ordinaire.

CONSTITUTION DES PÉTROLES

Dans un autre ordre d'idées, ce fut encore Cahours qui, en collaboration avec Pelouze, démontra que les carbures organiques prévus par les théories modernes ne sont point des entités tout au plus susceptibles de fournir des exercices de laboratoire, mais que les pétroles de Pensylvanie, exploités dès 1859, sont constitués par des mélanges de carbures saturés C^nH^{2n+2} où l'on retrouve les isomères de Wurtz. Toutefois, il fallut

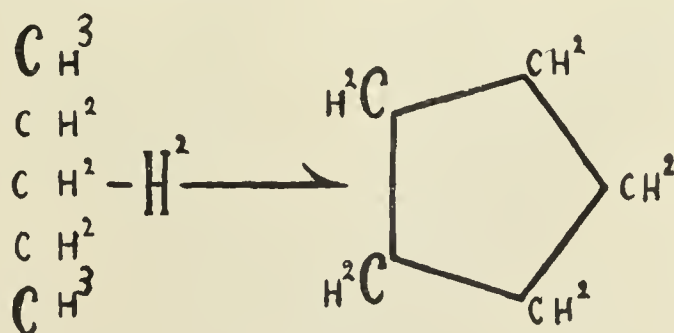


CAHOURS (1810-1891)

encore longtemps pour reconnaître parmi les éthylènes une classe de composés absolument saturés, c'est-à-dire incapables de fixer le chlore par addition bien que répondant à la forme déshydrogénée C^nH^{2n} . Cette fois les indications de la pratique précédèrent la théorie, quoiqu'on connût déjà la forme cyclique donnée par Kékulé à la benzine, sur laquelle nous reviendrons.

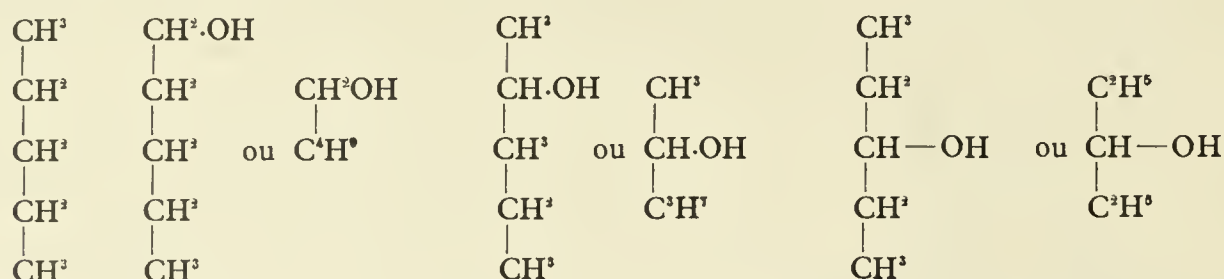
Schutzenberger et Jonine, ayant trouvé que cette classe de carbures constitue les pétroles du Caucase, ont expliqué, par la saturation mutuelle de leurs atomes, l'impossibilité d'obtenir avec eux des produits d'addition. Prenons par exemple le carbure normal en C^5 où les deux radicaux extrêmes sont des groupes méthyle CH^3 . Si nous enlevons un atome d'hydrogène à chacun d'eux, ils laisseront apparaître une valence libre qui, déterminant la soudure des deux radicaux

extrêmes, aboutira à la formation d'un cycle pentagonal dont tous les sommets sont des radicaux identiques, chacun étant saturé par le précédent et par le suivant :



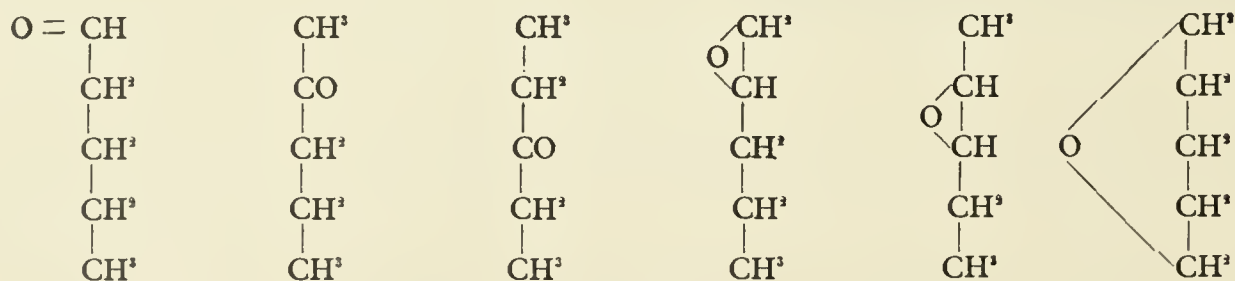
Cette cyclisation a été confirmée par la méthode d'hydrogénation de Sabatier et Senderens dont nous parlerons plus loin.

CONCLUSION C'est par centaines de mille que l'on compte actuellement les corps découverts par ces règles si simples que n'importe qui peut s'en rendre compte et, en quelque sorte, dresser le plan des édifices chimiques résultant de l'agencement des radicaux. En conservant pour exemple le carbure saturé en C^5 , disséqué par la méthode de Wurtz, il est impossible de ne pas s'apercevoir que la substitution d'un radical monovalent quelconque à l'hydrogène fournit trois dérivés différents. Choisissons le radical fonctionnel des alcools ; en tenant compte de la symétrie du carbure, on tire aussitôt les 3 schémas suivants qui ont été réalisés :



Naturellement, et pour le même motif, il existe plusieurs carbures C^5H^{12} , car il est possible d'agencer les substitutions autrement que dans l'ordre indiqué dans la formule ci-dessus, dite normale.

L'introduction dans le même carbure en C^5 de l'élément divalent O ou du radical NH à la place de H^2 donne un nombre d'isomères encore plus considérable dont voici quelques plans figuratifs.



Il est évident que la substitution du radical alcool OH à l'hydrogène d'un carbure contenant trois atomes de carbone donnera des produits fort différents selon que la substitution se fera dans un chaînon CH^3 , ou CH^2 ou CH . Dans le premier cas, le groupe altéré, renfermant trois atomes d'hydrogène, pourra supporter un premier degré d'oxydation, perdre H^2 et se transformer en un nouveau groupe fonctionnel HCO caractéristique des aldéhydes ; il pourra aussi donner une substitution oxygénée aboutissant au groupe $CO-OH$ caractéristique des acides. De tels

alcools sont dits primaires. La substitution de OH dans un chaînon CH^2 donne naissance à des alcools secondaires qui sont *encore* susceptibles de perdre H^2 par oxydation, transformant en groupe CO le radical $\text{H}-\text{C}-\text{OH}$, pour donner un acétone incapable d'engendrer un acide sans se détruire. Enfin, les alcools tertiaires, caractérisés par le groupe $\text{C}-\text{OH}$ qui ne renferme plus les deux atomes H nécessaires à la formation de l'eau, ne supportent pas l'oxydation.

Grimaux a rattaché ces trois variétés d'alcool au plus simple de tous : l'alcool

méthylque ou carbinol $\begin{array}{c} \text{H} \\ | \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\ | \\ \text{H} \end{array}$. En dehors de OH, la substitution d'un

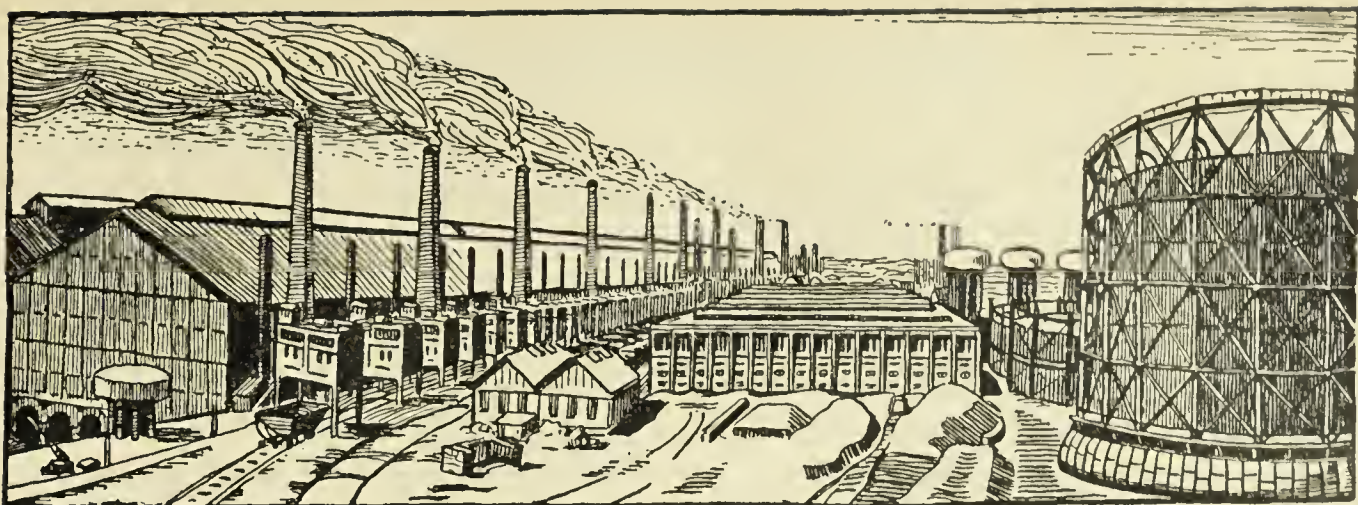
radical monovalent R à l'hydrogène donne un alcool primaire ; le remplacement de deux atomes d'hydrogène par deux radicaux monovalents fournit les alcools secon-

daires $\begin{array}{c} \text{R} \\ | \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\ | \\ \text{R}_1 \end{array}$; enfin, les alcools tertiaires sont les dérivés trisubsti-

tués $\begin{array}{c} \text{R} \\ | \\ \text{R}_2-\text{C}-\text{OH} \\ | \\ \text{R}_1 \end{array}$, conformément à la théorie du carbinol de Grimaux.

Il ne reste plus qu'à construire les édifices correspondants à ces symboles. Ce point exige des connaissances et des aptitudes qui relèvent surtout de la pratique du métier.





CHAPITRE III

LES MÉTHODES PARTICULIÈRES

A) I. Synthèses et réactions de Berthelot. — II. Pasteur et l'isomérisie optique. — Interprétation stéréochimique. — Applications. — III. Pasteur et les méthodes biologiques. — Culture des ferments. — Mécanisme des fermentations : diastases. — Applications. Fixation de l'azote par les plantes. — B) I. Série aromatique ou cyclique. — La benzine et ses homologues. — Polybenzines. — Fonctions par influence. — Migration. — II. La grande industrie organique. — Gaz d'éclairage. — Matières colorantes. — Parfums. — Térébenthine et camphres. — Résines et caoutchouc. — Médicaments; fonctions diverses. — Poudres de guerre et fibres textiles. — Colloïdes. — Matières albuminoïdes ou protéiques.

A. — I. SYNTHÈSES ET RÉACTIONS DE BERTHELOT



La théorie atomique ne se bornait point à grouper des corps; elle inspirait une méthode synthétique d'une puissance illimitée dont les modes de réalisation semblaient être désormais l'objet de la chimie. Les chimistes les plus autorisés avaient fait des réserves sur la possibilité de produire artificiellement les composés organiques naturels, invoquant une cause spéciale, la *force vitale*, que paraissaient sanctionner les observations de Cagniard de Latour sur les fermentations. Gerhardt lui-même écrivait dans son *Traité de chimie organique* : « Le chimiste fait l'opposé de la nature vivante. Il brûle, détruit, opère par analyse, tandis que la force vitale seule opère par synthèse, qu'elle reconstruit l'édifice abattu par les forces physiques. »

Gerhardt connaissait la synthèse de l'urée par Wœhler ; il savait que Dumas et Péligot avaient rattaché systématiquement aux carbures les corps organiques : les alcools et leurs éthers élaborés par les fruits, les acides résultant de leur oxydation comme le vinaigre et le venin des fourmis, etc. Si leurs procédés synthétiques n'avaient rien de commun avec ceux de la nature, ils n'en étaient pas moins féconds. C'est le mérite de Berthelot d'avoir vu que cette différence augmentait la puissance de la synthèse et d'avoir consacré à cette idée les ressources de son haut esprit.

Il débuta par la synthèse des corps gras, qui venait compléter l'œuvre analytique de Chevreul. Si, suivant les conclusions de Chevreul, Pelouze et Gelis, la glycérine était, au même titre que l'alcool, une base dont les corps gras constituaient des éthers, il n'y avait pas de raison, d'après Berthelot, pour qu'on n'arrivât pas à reconstituer ces éthers, comme on savait le faire pour tous les alcools connus. Mais la glycérine renferme trois atomes d'oxygène et les alcools n'en contiennent qu'un. Éclairé par la tribasicité de l'acide phosphorique, découverte par l'Anglais Graham en 1833, Berthelot soupçonna une propriété correspondante dans la glycérine, c'est-à-dire l'existence d'une triple fonction alcool. Il réussit à la mettre en évidence par trois éthérifications successives au moyen de l'acide acétique, puis des autres acides gras monobasiques. Il établit ainsi que la glycérine est un alcool triatomique et que les corps gras, huiles et graisses, en sont les triéthers, comme aussi la nitroglycérine, découverte à Paris par Sobrero vers 1849.

Le travail de Berthelot conduisit à représenter la glycérine par la formule $C^3 H^5 (OH)^3$ et à conclure que l'éthérification de chacun des radicaux OH met en liberté une molécule d'eau. Ce fait important, inaperçu jusque-là, est en outre l'origine de la découverte de l'équilibre dans l'éthérification. Ce point sera exposé au chapitre de la mécanique chimique.

Les acides et la glycérine utilisés dans ces expériences ayant une origine vitale, cette synthèse des corps gras ne levait pas toutes les objections ; aussi Berthelot entreprit une nouvelle série d'expériences.

Avant de réaliser la synthèse de l'alcool par la transformation de l'éthylène en sulfate d'éthyle qui, saponifié par l'eau, donne l'alcool, il avait appliqué l'action de l'eau alcaline aux dérivés de substitution monochlorés $CH^3 Cl$ et $C^2 H^5 Cl$, et obtenu par synthèse les alcools méthylique et éthylique, identifiant ces produits de substitution avec les éthers chlorhydriques des alcools. « Cette expérience, a dit l'Allemand Schorlemmer, marque une date dans la production systématique des composés organiques. » Elle justifiait la classification de Gerhardt.

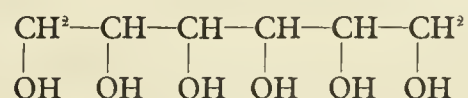
Parmi les synthèses dont la saisissante simplicité rappelle les actions natu-

relles, la plus inattendue est celle de l'acide formique par l'action directe de l'oxyde de carbone sur l'eau alcaline. L'eau et l'oxyde de carbone, obtenus au moyen de la réduction de l'oxyde de fer par le charbon, sont deux composés minéraux par excellence. Pourtant, de leur union résultait un acide initialement extrait des fourmis rouges et des orties, c'est-à-dire d'origine animale et végétale à la fois.

Quand Pasteur, après la découverte des isomères physiques, prétendit que la nature seule pouvait doter les corps du pouvoir rotatoire, Berthelot s'éleva contre cette affirmation, et engagea Jungfleisch à reprendre la synthèse de l'acide tartrique par le procédé de Perkin et Duppa (Anglais), mais en remplaçant l'éthylène extrait de l'alcool par de l'éthylène résultant de l'hydrogénation de l'acétylène synthétique. Or, l'origine absolument minérale des corps employés par Jungfleisch ne changea rien au résultat. Comme ses prédécesseurs, il obtint un racémique dédoublable en ses isomères optiques ; ce qui confirmait l'inanité de la force vitale.

Ces synthèses, qui nous semblent aujourd'hui évidentes, suscitaient le doute des témoins les mieux qualifiés de ces expériences, imbus du préjugé de la force vitale. Néanmoins, elles appelaient l'attention des chercheurs sur l'importance des voies synthétiques.

En dehors de ces synthèses totales, la constitution des alcools polyatomiques, celles des sucres, de l'amidon et des celluloses sont le résultat des idées de Berthelot et de Wurtz. Si le glycol se rattache à l'éthane $C^2 H^6$, la glycérine au propane $C^3 H^8$, les homologues de ces carbures devaient fournir par le même processus des alcools polyatomiques. Le carbure normal $C^6 H^{14}$, par exemple, devait donner :



Cette prévision fut justifiée par l'obtention d'éthers hexatomiques, parmi lesquels un explosif violent, l'hexanitromannite, isolé par Berthelot. D'autre part, ces alcools, lentement oxydés, perdent H^2 et donnent de nombreux hydrates de carbone $C^6 H^{12} O^6$ ou $C^6 (H^2 O)^6$. Le glucose provient de l'oxydation d'un des groupes CH^2

$\begin{array}{c} | \\ OH \end{array}$; c'est un aldéhyde qui reste alcool pentatomique. Alors que l'oxydation

du chaînon $\begin{array}{c} CH \\ | \\ OH \end{array}$ donne le groupe acétonique $C=O$, du lévulose ou sucre des

fruits, qui, également, reste cinq fois alcool, car son éthérification exige cinq molé-

cules d'acide monobasique. L'étude complète de ces composés exige toutefois la connaissance de l'isomérisie optique exposée plus loin.

Quant à l'amidon et à la cellulose, hydrates de carbone, dérivés du glucose par perte d'eau, comme nous l'avons vu, ces molécules condensées renferment encore des groupes alcooliques qui expliquent leurs transformations si importantes en éthers nitriques et acétiques (fulmicoton et acétocelluloses).

SYNTHÈSE DES HYDROCARBURES

La synthèse totale des hydrocarbures devait être tentée par Berthelot pour deux raisons. Les corps de la série grasse se rattachant à des carbures fondamentaux, il fallait au moins faire la synthèse totale de l'un d'eux pour montrer que leur genèse était indépendante de la force vitale. D'autre part, la distillation du goudron de la houille ayant donné naissance à la série nouvelle des corps aromatiques, il convenait de réaliser leur synthèse et de les rattacher aux paraffines.

Berthelot était encore préparateur de Balard quand, par la décomposition de l'alcool et par celle de l'acide acétique à haute température, il avait obtenu la benzine, la naphthaline et d'autres produits trouvés dans la distillation de la houille. Il concluait justement à la synthèse de ces corps, puisque l'Allemand Kolbe avait déjà réalisé celle de l'acide acétique en partant du sulfure de carbone. Du même coup, il rapprochait les deux séries. Cette méthode indirecte ne lui ayant pas donné complète satisfaction, Berthelot tenta, en 1867, de combiner directement les deux éléments constitutifs des hydrocarbures : le charbon et l'hydrogène. En faisant jaillir l'étincelle électrique entre deux pôles de charbon dans une atmosphère d'hydrogène, il constata que l'hydrogène s'unit directement au carbone sous forme d'acétylène C^2H^2 , qu'il sépara de l'excès d'hydrogène par le chlorure cuivreux. Par réactions pyrogénées, il transforma les mélanges d'hydrogène et d'acétylène en éthylène et autres carbures de la série grasse, tandis que l'acétylène pur fournit de la benzine et plusieurs autres produits de condensation sous l'action prolongée de la chaleur. Ainsi Berthelot rattachait à l'acétylène les corps de la série grasse et ceux de la série aromatique.

La synthèse de la benzine témoignait d'une rare habileté. Réalisée en cloche courbe sur la cuve à mercure à une température voisine de la fusion du verre, elle donnait une si faible quantité de benzine qu'on ne pouvait songer à la séparer des produits multiples de la condensation de l'acétylène. Berthelot eut recours à la succession des réactions qui transforment la benzine en matières colorantes.

Très suggestive, la condensation de l'acétylène inspira à l'Écossais Ramsay

l'expérience décisive qui a fixé la constitution de la pyridine, noyau des alcaloïdes, et à l'Allemand Meyer la synthèse du thiophène.

La méthode d'hydrogénation universelle des corps organiques par une solution saturée de gaz iodhydrique agissant en vase clos à 300 degrés fournit à Berthelot un précieux moyen de ramener un composé organique à son carbure fondamental. C'est ainsi qu'il put affirmer que le camphre n'était pas un produit aromatique dérivé de la benzine, comme le pensaient tous les chimistes, mais qu'il dérivait de carbures en C⁵, opinion que les faits justifèrent dans la suite.

L'action de l'arc électrique sur un mélange d'acétylène et d'azote couronnait ce genre de recherches par la synthèse de l'acide cyanhydrique en dehors de la force vitale. Depuis longtemps Pelouze avait transformé ce composé en acide formique, et cette réaction, généralisée par Dumas, Malaguti et Le Blanc, avait conduit ces savants à la synthèse de tous les acides organiques. Gerhardt ayant érigé son tableau d'homologie sur la connaissance des acides gras, la possibilité de la synthèse totale des composés organiques compris dans ce tableau était donc démontrée.

Pour en finir avec la force vitale imaginée par Liebig, Berthelot avait multiplié ses expériences et inauguré des procédés de réalisation et d'investigation originaux, différents de ceux qu'employaient les adeptes de la théorie atomique. Outre l'usage de l'arc électrique, citons celui de l'effluve électrique ou décharge obscure, dont il tira les délicates synthèses des acides persulfurique et pérázotique, la fixation de l'azote sur les corps organiques, etc. Enfin, rappelons que son ozoniseur permit à MM. Hautefeuille et Chapuis d'élucider l'histoire de l'ozone, dont l'Allemand Schœnbein et le Genevois Soret avaient fourni les points de départ.

On aura une complète idée de l'œuvre accomplie par Berthelot dans sa longue carrière, quand on lira plus loin ses recherches sur la mécanique chimique, la fabrication des explosifs, la chimie agricole, la chaleur animale, le camphre synthétique, etc. Mais il convient, avant d'exposer les éléments de la série aromatique, de commencer l'histoire si féconde de l'œuvre chimique de Pasteur.

A. — II. PASTEUR ET L'ISOMÉRIE OPTIQUE

P^{PASTEUR} Le progrès d'une science expérimentale est lié à celui des autres sciences. C'est ainsi que la découverte de la polarisation rotatoire par Biot eut en chimie d'importantes répercussions.

Depuis Fresnel, les physiciens admettent que la lumière résulte de deux mou-

vements vibratoires rectangulaires imprimés aux particules de l'éther dont ils supposent l'espace rempli. D'autre part, quelques minéraux transparents doivent à leur forme cristalline et à une taille savante en forme de plaque le pouvoir d'arrêter une des vibrations d'un rayon lumineux émis perpendiculairement à la lame. Si l'on applique sur celle-ci une seconde plaque identique, il suffit de faire tourner l'une d'elles autour de l'axe commun pour que la seconde vibration du rayon lumineux qui traverse les deux lames s'affaiblisse progressivement et disparaisse quand la rotation atteint 90 degrés, si bien qu'alors le rayon lumineux s'éteint complètement. Biot découvrit encore que, si la plupart des liquides ou des solutions salines interposés entre les deux plaques ne changent rien à leur action, certains liquides et certaines dissolutions organiques détruisent en partie l'effet de la rotation de la seconde plaque. Pour éteindre de nouveau la lumière, il faut faire tourner celle-ci d'un angle proportionnel à l'épaisseur de la couche liquide. Cette propriété, inhérente à la structure moléculaire des corps dissous et non plus à celle de leurs cristaux, constitue la *polarisation rotatoire*. Elle est mesurée par l'angle dont il faut faire tourner la plaque soit vers la gauche, soit vers la droite ; et, selon le sens de la rotation, le corps est dit *lévogyre* ou *dextrogyre*.

Pour rendre les opérations comparables, on opère dans un tube long de 0,1 m., une des lames polarisantes étant à l'entrée, l'autre à la sortie du tube, et sur des solutions contenant une molécule-gramme par litre. Cette découverte de Biot a permis à Pasteur d'étendre dans des proportions incroyables le champ de la chimie organique en décelant un nouveau genre d'isomérisie qui, plus tard, fut révélé dans les composés minéraux.

L'acide racémique, extrait du tartre des vins d'Alsace en 1822 par Kestner, n'a pas de pouvoir rotatoire, à l'inverse de l'acide tartrique des vins ordinaires, qui a un pouvoir dextrogyre. Pasteur ayant observé que les cristaux de ce dernier possèdent une facette hémiedrique invariablement située dans le cristal, tandis que l'acide racémique ne présente pas cette particularité, eut l'intuition que celui-ci était formé de deux genres de cristaux symétriques de pouvoir rotatoire opposé. La cristallisation du racémate double de soude et d'ammoniaque lui fournit précisément ces deux variétés de cristaux : les uns hémiedres à droite, les autres à gauche. Il les tria à la pince, et observa qu'en effet les cristaux de même forme avaient un pouvoir rotatoire propre, dextrogyre pour les uns, lévogyre pour les autres. Ce caractère se retrouve dans les acides extraits de ces deux genres de sels : l'un est identique à l'acide tartrique ordinaire, et l'autre présente l'hémiedrie symétrique gauche prévue par Pasteur, avec pouvoir rotatoire égal et contraire ; et des poids égaux de ces deux

acides, dissous dans le même liquide, fournissent un corps identique en tous points à l'acide racémique, c'est-à-dire n'ayant plus ni pouvoir rotatoire ni hémiédrie. Deux corps hémiédres de même poids sont donc constitués d'éléments identiques par leur composition, leur forme et leurs dimensions. Ils ne diffèrent que par une disposition de ces éléments, qui les rend symétriques, mais non superposables « comme deux escaliers circulaires identiques tournant en sens inverse, comme aussi la main droite et la main gauche dont l'une est l'image de l'autre dans une glace, ou encore deux tétraèdres irréguliers symétriques... ».

La réalisation de ces édifices symétriques exige le même travail mécanique. Comme tout travail correspond à une quantité de chaleur proportionnelle, si cette disposition symétrique se poursuit dans la structure moléculaire, il en résulte que des isomères optiques sont formés avec le même dégagement de chaleur et ne se distinguent que par des caractères purement physiques, qui se manifestent par un pouvoir rotatoire égal et contraire de dissolutions au même taux.

Dans les dissolutions, la forme cristalline fait place à la forme moléculaire, et l'égalité en valeur absolue de ces effets optiques est une preuve de cette symétrie affirmée par Pasteur, puisqu'il suppose que dans des isomères actifs les atomes sont disposés symétriquement.

Cette conception, qui doublait le nombre des corps actifs, se vérifia quand Pasteur eut trouvé des méthodes de dédoublement applicables à tous les racémiques. Outre la cristallisation, l'action des moisissures lui fournit un moyen qui devait entraîner ses grandes découvertes biologiques. Le *pénicillium glaucum* (moisissure vulgaire),ensemencé dans une dissolution d'acide racémique, détruit rapidement le constituant lévogyre, de sorte que l'observation polarimétrique des solutions



PASTEUR (1822-1895)

dénote la présence de la variété dextrogyre à mesure que disparaît le lévogyre.

L'affinité prépondérante d'un acide lévogyre pour une base dextrogyre, ou inversement, constitue la troisième méthode de Pasteur et la plus communément employée pour dédoubler un racémique.

Telle est la nouvelle branche de chimie créée par ce maître, avec les méthodes spéciales dont il l'a dotée. Il ne s'en tint pas là. Frappé du fait que la plupart des corps organiques ne jouissent pas du pouvoir rotatoire, il soupçonna l'existence d'une molécule tartrique inactive par nature. En chauffant toutes les variétés tartriques vers 180 degrés avec un peu d'eau, il vit en effet que l'acide racémique est mélangé d'acide inactif par nature, et sépara ces deux espèces en utilisant la faible solubilité du racémate acide de potasse. Mais à tout corps actif ne correspond cependant pas un acide inactif : l'acide malique se transforme en racémique, mais ne donne jamais d'inactif par nature.

INTERPRÉTATION STÉRÉO-CHIMIQUE

Pour interpréter ces faits, les formules planes de la théorie atomique ne suffisent plus. La tétravalence du carbone suggéra une interprétation frappante à M. Le Bel, qui, en 1873-1874, travaillait au laboratoire de Wurtz, où Van't Hoff vint collaborer avec lui.

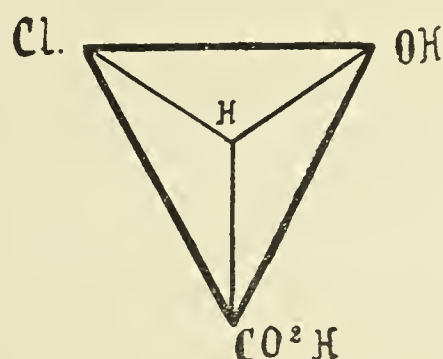
La disposition tétraédrique indiquée par Pasteur s'adaptait naturellement à la tétravalence du carbone, pourvu que les radicaux monovalents assimilés à des points matériels constituassent les quatre sommets du tétraèdre, le *carbone asymétrique*, auquel ils étaient liés, se trouvant au centre de la figure. Van't Hoff supposait même que le tétraèdre était régulier : pourvu que les quatre radicaux soient différents, les deux figures peuvent avoir des dimensions identiques, sans être superposables.



LE BEL (1847)

Pour justifier expérimentalement l'image de l'isomérisie physique à laquelle il s'était arrêté, M. Le Bel s'ingénia à préparer des corps comportant quatre radicaux monovalents différents. Obtenus par synthèse, ces corps étaient en égale proportion dextrogyres et lévogyres : c'étaient des racémiques. Le Bel réussit dans tous les cas à les dédoubler en appliquant les méthodes ci-dessus décrites. De plus, en transformant l'un des radicaux constitutifs en un autre faisant déjà partie de la molécule, il faisait disparaître le pouvoir rotatoire, parce qu'un plan de symétrie apparaissait dans la figure tétraédrique et déterminait la possibilité d'une superposition des deux tétraèdres symboliques initiaux.

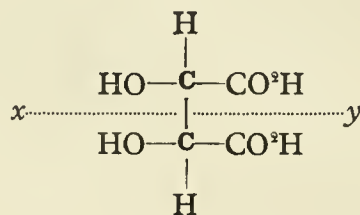
L'acide chlorolactique, par exemple, renferme un atome de carbone uni aux radicaux différents CO^2H , H , Cl et OH :



donc cet acide possède une forme lévogyre et une forme dextrogyre. Si l'on réduit l'une et l'autre variétés par la méthode de Melsens, le chlore se trouve remplacé par un atome d'hydrogène. Les tétraèdres, ayant alors deux sommets identiques, deviennent superposables, et on constate la disparition absolue du pouvoir rotatoire.

Un composé peut contenir plusieurs atomes de carbone asymétrique : soit $+a$ et $-a$ les pouvoirs rotatoires engendrés par un premier atome de carbone asymétrique ; soit $+b$ et $-b$ les pouvoirs rotatoires propres à un deuxième atome de carbone ; le pouvoir des corps résultants sera $[+a + b]$ et $[+a - b]$ en agissant sur le dextrogyre $+a$; il sera $[-a + b]$ et $[-a - b]$ avec le lévogyre $-a$. Le nombre des corps actifs est donc doublé par l'apparition d'un second atome de carbone asymétrique. L'introduction d'un troisième atome de carbone asymétrique agissant sur chacun des corps précédents en doublera encore le nombre, de sorte que le total N des isomères relatifs à un nombre n d'atomes de carbone asymétriques est égal à 2^n ; c'est la règle de Van't Hoff : $N = 2^n$.

Revenons à la molécule tartrique. Elle contient deux parties identiques séparées par la ligne xy . Chacune est monovalente et renferme un atome de carbone asymétrique identiquement lié à trois radicaux H , OH , CO^2H , auxquels s'ajoute la demi-molécule $C^2O^3H^3$ afférente au carbone asymétrique C de l'autre partie.

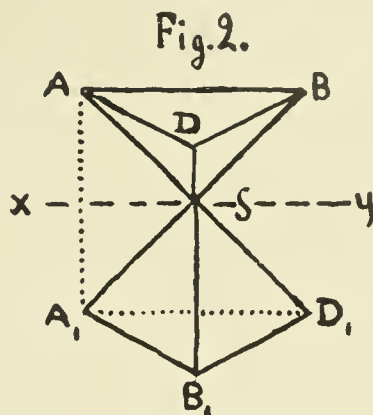
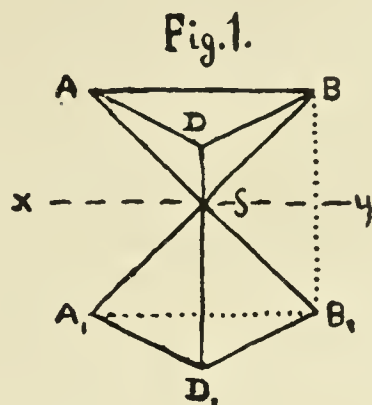


Autrement dit, un des tétraèdres symboliques a pour sommet le carbone asymétrique de l'autre.

Dans ce cas $a = b$ en valeur absolue, d'où $[a - b] = [b - a] = 0$; et alors il existe un assemblage indissoluble de deux tétraèdres, tel que l'effet de l'un détruit l'effet de l'autre; c'est l'inactif par nature. Il ne reste que les valeurs, les combinaisons distinctes $[a + b] = 2a$ et $[-a - b] = -2a$, qui correspondent aux deux corps de pouvoirs rotatoires égaux et contraires de Pasteur. Leur juxtaposition donne le racémique, tandis que l'inactif par nature reste mono-moléculaire, comme les variétés droite et gauche. Si dans le schéma ci-dessus on remplace chaque groupe CO^2H par CH^2OH , monovalent comme lui, on obtient l'alcool tétratmique correspondant, l'érythrite ou sucre de lichen, dont la constitution avait été reconnue par de Luynes. Comme l'acide tartrique, et pour les mêmes raisons stéréochimiques, cet alcool existe sous la forme racémique et sous la forme inactive par nature, qui est celle du sucre de lichen. En partant de l'érythrène (butane-diène) extrait du gaz portatif, M. Griner, alors préparateur de Wurtz, a réalisé séparément la synthèse de la variété naturelle non dédoublable, puis celle des composés racémiques, en partant des deux isomères stéréochimiques inactifs provenant de l'oxydation modérée de l'érythrène. Ces faits apportent une confirmation à la stéréochimie de l'acide tartrique.

Toutefois, voici une remarque essentielle à notre avis. La formule $N = 2^n$ suppose que chaque tétraèdre conserve son individualité, c'est-à-dire son asymétrie propre, alors qu'ils concourent à la formation d'une nouvelle molécule statique, rigide, dans l'acide tartrique. Or, dans la *figure 1*, admise par Van't Hoff, on aperçoit deux tétraèdres réguliers d'asymétrie contraire, avec plan de symétrie (xy) dans la molécule, puisque les points $A A$, figurant des

radicaux identiques et B et B₁ sont dans le plan du tableau, et que les points D D₁ sont en avant du tableau.



Un tel schéma répond de toute façon à la forme inactive. Faisons maintenant tourner de 120 degrés dans son plan la base inférieure de façon que A₁ se place sous D et D₁ sous B ; la symétrie disparaît et il est facile de voir que le prisme résultant est l'image spéculaire de celui qu'on obtient en faisant tourner la base inférieure de 120 degrés dans le sens contraire. Ces schémas prismatiques répondent donc aux isomères tartriques, quoique formés de tétraèdres d'asymétrie contraire dont les effets optiques se détruisent.

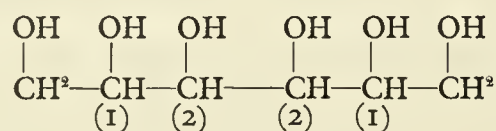
Manifestement le plan xy cesse d'être un plan de symétrie dans la figure 2 qui constituée par deux tétraèdres de même asymétrie pourra pour ce double motif figurer l'acide dextrogyre, par exemple, tandis que son image spéculaire représentera le lévogyre ; mais alors, selon que l'arête prismatique AA₁ sera constituée par H et H ou par OH et OH ou par CO²H et CO²H, on aura trois symboles dextrogyres différents et autant de lévogyres. De là une nouvelle contradiction entre l'expression ($N = 2^n$) et les symboles stéréochimiques figurés par les juxtapositions tétraédriques généralement adoptées. On doit au moins conclure de là que le nombre calculé N est un minimum. Cette déduction est d'ailleurs sanctionnée par la *multi-rotation* qui est le double pouvoir rotatoire du glucose à 100° et vers 15°, observé dès 1822 par Dubrunfaut, puis étendu par Tanret ; elle l'est aussi par l'existence de trois dérivés bitartriques inactifs (Darzens, 1912).

APPPLICATION AUX SUCRES Avant d'aborder la synthèse des sucres C⁶ (H²O)⁶, remarquons que leur similitude n'est qu'apparente. En effet, M. Maquenne a rattaché l'inosite des haricots verts et des feuilles de noyer à l'hexaphénol C⁶ (OH)⁶ qu'il avait obtenu par l'action de l'acide chlorhydrique sur

le composé d'oxyde de carbone et de potassium CO.K formé dans la préparation de ce métal par le procédé Deville. L'inactivité de ce sucre naturel s'expliquait par la symétrie attribuée à sa constitution. La découverte d'une inosite active par Maquenne obligea d'attribuer à ce composé une expression stéréochimique.

Quant aux sucres proprement dits, leur synthèse a été faite par plusieurs méthodes. Grimaux oxyda la glycérine par la mousse de platine. Le procédé d'aldolisation de Wurtz permet de transformer le formol ou aldéhyde méthylique en fructose. Enfin Schutzenberger ayant fixé l'acide cyanhydrique sur ces hydrates de carbone, Kiliani partit de ces nitriles pour passer d'un sucre à son supérieur, en particulier pour transformer le glucose en perséite, sucre de forme $\text{C}^7 (\text{H}^2\text{O})^7$ que M. Maquenne avait caractérisé et dont Bourquelot avait trouvé un isomère : la volémité du champignon.

La question des sucres a surtout fait ressortir la portée de l'isomérisation pasteurienne. Ces corps existent dans le lait (lactose) et dans le suc de nombreuses plantes. Les plus simples sont des hydrates de carbone en C^6 . Ce sont tous des produits d'oxydation des alcools hexatomiques dérivés du carbure normal C^6H^{14} , dans lequel, par définition, les chaînons extrêmes sont des radicaux CH^3 , et les autres des groupes CH^2 . Ces alcools ont donc pour forme :



A ne considérer que les radicaux constituants et leur ordre dans la molécule, il semble qu'il n'existe qu'un seul alcool répondant à ce type. Or, Proust avait extrait, en 1806, la mannite de la manne des frênes, Laurent la dulcité de la manne de Madagascar et Boussingault la sorbite des baies du sorbier ; ces trois alcools répondent à la formule précédente, bien qu'ils diffèrent entre eux par leur pouvoir rotatoire et leurs dérivés d'oxydation. Cette formule résulte en effet de la condensation de deux molécules de glycérine, réalisée par Grimaux ; elle dénote d'ailleurs l'existence de plusieurs isomères physiques à cause de ses deux groupes symétriques en C^3 qui renferment deux atomes de carbone asymétriques : le premier $\text{C}_{(1)}$ lié à $\text{CH}^2.\text{OH}$ à H , à OH et au résidu $\text{C}^4\text{H}^9\text{O}^4$; le second carbone $\text{C}_{(2)}$ lié aux quatre groupes différents $\text{C}^2\text{H}^5\text{O}^2$, H , OH , et $\text{C}^3\text{H}^7\text{O}^3$. Les carbones $\text{C}_{(1)}$ et $\text{C}_{(2)}$ entraînent donc l'existence d'isomères nombreux, qui se multiplient considérablement quand on passe des alcools hexatomiques aux sucres par oxydation, car le premier degré d'oxydation, agissant sur un des groupes fonctionnels $\text{CH}^3 - \text{OH}$, le transforme en

aldéhyde ; tandis qu'en agissant sur le deuxième groupe, il change la fonction alcool secondaire en radical CO. De l'oxydation résultent deux groupes de sucres : le premier, à fonction aldéhydique (type glucose), possède quatre atomes de carbone asymétrique et répond, par conséquent, à seize isomères monosaccharides, d'après la formule de Van't Hoff $N = 2^n$, alors que, dans le groupe acétonique (type fructose) le nombre n des atomes de carbone asymétrique, réduit à trois, correspond à huit isomères stéréochimiques.

En se conformant strictement aux indications de Van't Hoff, M. Fischer, en Allemagne, est parvenu à fabriquer toutes les espèces de monosaccharides répondant au nombre $N = 2^n$. Un petit nombre seulement de ces sucres existe à l'état naturel. Les plus répandus sont le glucose, le lévulose et la galactose. Le premier, extrait du raisin par Proust pour remplacer le sucre de canne pendant le blocus continental, est un sucre aldéhydique dextrogyre ; il est mélangé au lévulose dans la plupart des fruits mûrs, dans le miel et dans le sucre des diabétiques. Au point de vue physiologique, il se forme dans les feuilles sous l'influence de la chlorophylle, d'après Dehérein. Combiné avec le lévulose, il constitue le sucre de canne ou de betterave (le saccharose), qui, par conséquent, est un bisaccharide. Le galactose est aussi un sucre aldéhydique qui, par hydrogénation, fournit la dulcité. Combiné au glucose, il donne le galactose ou sucre de lait, autre bisaccharide. Quant au lévulose, c'est un monosaccharide du type acétonique abondant dans la groseille et d'autres fruits sucrés. Ces trois sucres sont réducteurs et fermentescibles, tandis que cette propriété capitale, base des industries de fermentation, n'existe pas chez quelques autres isomères optiques. D'où l'on voit que le caractère physique de l'isomérisation pasteurienne entraîne, quand il se multiplie dans une même molécule, des différences très importantes.

Voici d'autres considérations :

La concordance entre la formule de Van't Hoff et les belles vérifications auxquelles M. Fischer s'est arrêté, a clos, pour la plupart des chimistes, la question de l'isomérisation physique ; cependant on ne saurait trop répéter que la formule de Van't Hoff n'englobe pas les phénomènes de multirotation. Par la force des idées reçues, la préparation d'un troisième acide bichlorotartrique inactif par M. Darzens n'a pas troublé davantage la conviction des chimistes, pas plus que ne l'avait antérieurement ébranlée la caractérisation par M. Meunier d'un second dérivé hexachloré de la benzine. On conserva la formule plane hexagonale qui n'en prévoyait qu'un, jusqu'à ce que le travail de Baeyer sur les dérivés hydrophthaliques eût confirmé celui de M. Meunier et interprété sa découverte

par la stéréochimie. Avec la synthèse industrielle de l'indigo, ce travail du savant bavarois fait époque.

Peut-être s'étonnera-t-on moins du manque de concordance entre les conceptions de Pasteur et leur interprétation stéréochimique, si l'on songe que la théorie atomique, qui a guidé si sûrement Williamson dans la synthèse des éthers et qui a donné tant de corps nouveaux, reste impuissante devant la synthèse du sucre de canne, dont le mécanisme paraît cependant comparable à la formation d'un éther-oxyde, puisqu'elle résulte de la condensation d'une molécule de glucose et d'une molécule de lévulose avec perte d'eau.

On pouvait espérer que M. Bourquelot atteindrait ce but. Ce savant, dans l'étude des glucosides, avait en effet obtenu la combinaison du glucose avec de nombreux alcools par l'intermédiaire de certains ferments. Il avait en outre constaté qu'une levure est capable de reconstituer le glucoside qu'elle détruit, de sorte que l'action fermentaire est réversible. Cette observation est incontestablement intéressante au point de vue de la préparation des corps par voie microbiologique. Mais l'action inverse n'a pas lieu pour le saccharose, dont le dédoublement par l'invertine, dont usait Bourquelot, est total et irréversible, comme il l'est par les acides.

A. — III PASTEUR ET LES MÉTHODES BIOLOGIQUES

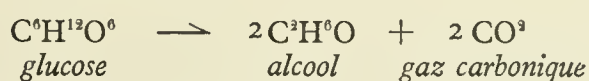
CULTURE DES FERMENTS Conformément à la méthode de Lavoisier, l'école française avait pénétré la constitution de la molécule par l'analyse et la synthèse, l'analyse déterminant les radicaux constituants, et la synthèse les replaçant dans l'ordre voulu. Cette œuvre si vaste n'englobait pourtant pas toute la chimie. Certains procédés de réalisation journallement employés demeuraient obscurs et, déjà dans la première moitié du dix-neuvième siècle, des savants français, assez indifférents aux suggestions théoriques, préparaient de nouveaux champs d'investigation. Rappelons seulement Dubrunfaut, Payen et Persoz.

La fermentation est une des plus anciennes sources de réaction. Mais si toujours on a fabriqué des boissons fermentées et du vinaigre, il fallut la découverte du microscope et les observations de Cagniard de Latour, puis de Schwann (Allemand), pour reconnaître que ces phénomènes microbiens étaient d'ordre biologique.

Après l'étude du développement de la moisissure ordinaire qui,ensemencée

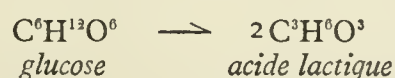
dans une solution d'acide racémique, se fait aux dépens de la variété dextrogyre de ce genre d'acide tartrique, Pasteur admit l'interprétation précédente, et reprit l'étude méthodique de ces questions. Partisan de la panspermie, c'est-à-dire de la nécessité de germes préexistants dans l'air ou dans l'eau, il s'attacha à la culture de ces germes. Il les sélectionna, puis appropria les milieux en les stérilisant par surchauffe afin de détruire toute semence étrangère et après addition des éléments minéraux indispensables à toute végétation. Opérant en ballons scellés ou dans des vases fermés par des tampons de coton stérilisés à 150 degrés, il empêchait l'accès des germes extérieurs.

Cette méthode impeccable, rapidement propagée, passa des laboratoires dans les usines sous l'impulsion de Pasteur lui-même, qui, à la brasserie de Tantonville près de Nancy, inaugura la fabrication des levures. De cet essai Hansen et Jacobsen, en Danemark, devaient faire une industrie de premier ordre fournissant un élément indispensable à la panification, à la fabrication des boissons fermentées et à celle de l'alcool d'industrie : la levure de bière. Ce ferment agit suivant l'équation dont Gay-Lussac s'est servi pour établir la constitution du glucose :



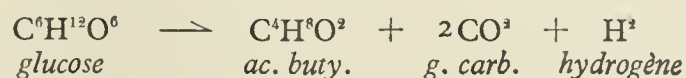
Le résultat de cette décomposition présente un immense intérêt, car les industries de fermentation sont la source la plus productive des revenus d'État.

La nature de cette altération du milieu par le ferment dépend du microbeensemencé. Si l'on remplace dans la liqueur sucrée la levure de bière par le ferment lactique des fromageries, le dédoublement est tout autre et s'exprime comme il suit :



Généralement les dédoublements sont plus compliqués. Dans la fermentation alcoolique, on trouve de l'acide succinique, et Pasteur en a extrait de la glycérine. D'après Bechamp, il se produit aussi un peu d'acide acétique dans la fermentation lactique.

Le ferment butyrique, isolé par Pasteur, agit sur le glucose en ajoutant au gaz carbonique un dégagement d'hydrogène.



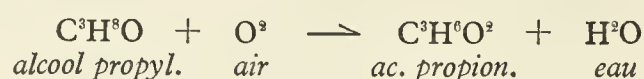
L'industrie de l'acide citrique, installée à Thann par Kestner, repose aussi sur la transformation du glucose par un microbe spécial (citromycète), et démontre comme les précédentes qu'il n'existe aucune relation possible à prévoir entre le corps générateur et le produit obtenu.

Après avoir observé l'action de divers ferments sur un milieu donné, le glucose, faisons varier le milieu. Dans une solution de mannite, alcool hexatomique, le ferment lactique se développe en provoquant la formation d'acide lactique et d'hydrogène. Voici d'autres exemples de la diversité d'action d'un ferment donné :

Le type des ferments oxydants qui nécessitent l'intervention de l'air (*aérobies*) est le *mycoderma aceti* ou mère de vinaigre. Il sert dans la pratique à transformer en vinaigre le vin ou l'alcool dilué dans l'eau :



Mais, si l'on change de milieu, son action ne se borne pas à la production de l'acide acétique ; au contact de l'alcool propylique aéré, il donne l'acide propionique :



Et, d'après M. Boutroux, il transforme le glucose en acide gluconique $\text{C}^6\text{H}^{12}\text{O}^7$.

Le rôle des ferments aérobies est parfois très énergique : les fleurs de vin (*mycoderma vini*), qui se développent dans les vases à demi vides et mal bouchés, déterminent la combustion lente mais totale de l'alcool :



Le ferment nitrique de nos deux célèbres agronomes Schlœsing et Muntz a donné la solution de questions hygiéniques de première importance. Ensemencé sur du mâchefer destiné à filtrer une eau polluée, il détruit tous les germes nocifs que cette eau contient ; de sorte que le ferment s'adapte à merveille à l'épuration des eaux de rivière, naturellement aérées, destinées à la consommation des villes. C'est encore lui qui agit dans l'assainissement des fosses d'aisance dites *fosses septiques*.

Pour compléter cette étude, il restait à connaître l'action de corps étrangers sur le résultat des fermentations et celle de la température. On a vu que la levure de bière donne des réactions réductrices accompagnées d'un dégagement d'hydrogène

dans certains cas. Or, si la présence de l'air est indispensable au développement des ferments oxydants, elle ne l'est pas à celui des germes analogues à la levure de bière. Cependant, dans des liquides fortement aérés, le travail de cette levure est modifié : MM. Trillat et Sauton ont en effet constaté dans ces conditions la présence de quantités abondantes d'aldéhyde, provenant de l'oxydation de l'alcool.

Voici encore un bel exemple de la modification du travail d'un ferment par introduction d'un corps étranger dans le milieu où il se développe. La glycérine, dont Pasteur a remarqué la production normale dans la fermentation alcoolique, devient sinon prépondérante, du moins utilisable industriellement, grâce à une addition de 5 pour 100 de carbonate de soude aux liqueurs. Ce procédé fut utilisé par les Allemands pendant la guerre pour remédier à l'insuffisance des huiles et des graisses, sources normales de la glycérine.

Les effets de la température sur l'intensité des actions microbiennes ont été étudiés par Pasteur en même temps que ceux de la concentration.

La levure de bière agit très lentement à 0 degré et son action, maxima vers 30 degrés, diminue ensuite très rapidement quand la température augmente. C'est pourquoi la vinification du raisin se fait si difficilement en pays chaud. La fermentation dégageant de la chaleur, le jus de fruits chauffés au soleil atteint rapidement une température de 40 degrés, qui arrête la fermentation. L'emploi de la glace permet de descendre à la température optima et de remédier à ce grave inconvénient. Ainsi, l'étude scientifique des fermentations améliorerait une pratique immémoriale.

Pasteur eut encore l'intuition qu'un microbe présente des espèces variées et que la température en modifie l'action et les sécrétions. La question si obscure du bouquet des vins de luxe, par exemple, dépend de la variété des levures qui interviennent, si bien qu'en stérilisant un jus bordelais et en l'ensemencant de ferment bourguignon, le bouquet du vin de Bourgogne apparaît. D'autre part, tout le monde sait comment Pasteur a modifié le rôle de la bactérie charbonneuse découverte par Davenne, et comment, en la cultivant à 42 degrés, il lui fit perdre sa virulence pour la changer en vaccin de la maladie du charbon. Mais on n'a pas assez remarqué que ce merveilleux résultat, étendu à d'autres maladies, s'applique aux actions chimiques. Cependant, à la fin du dix-neuvième siècle, différentes espèces du bacille sulfhydrique ont été étudiées par Miquel, et le savant microbiologiste du laboratoire de Montsouris avait montré que les unes ne supportent pas la température de 50 degrés, tandis que les autres continuent vers 80 degrés à changer en gaz sulfhydrique le soufre des matières organiques.

Les effets des diastases vont étendre le champ de cette remarque.

MÉCANISME DES FERMENTATIONS

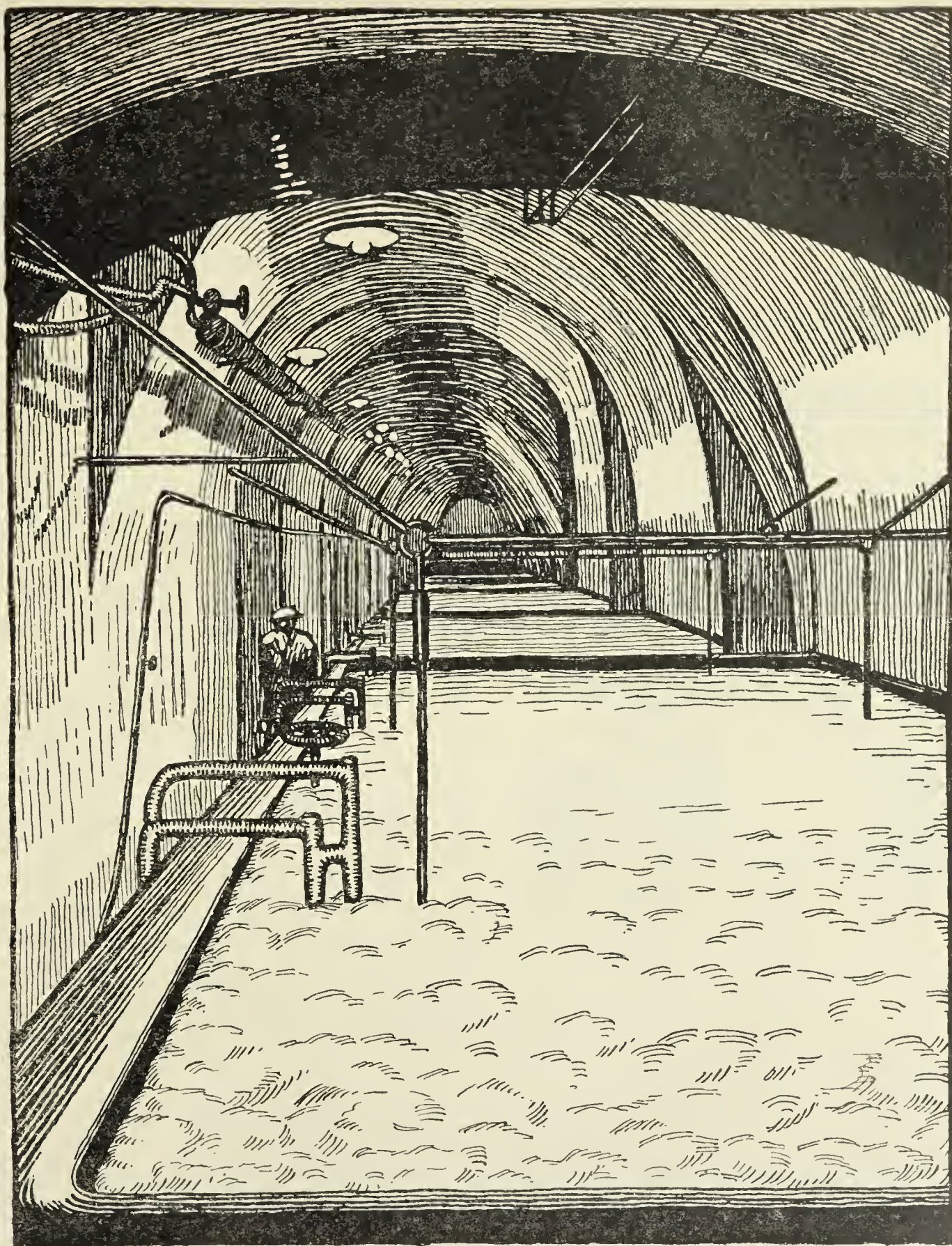
Gay-Lussac n'admettait point l'explication biologique des actions chimiques déterminées par les microbes ; et le Genevois Théodore de Saussure rapprochait l'action des acides étendus sur l'amidon de celle des diastases sans l'expliquer, quand Clément-Desormes indiqua le mécanisme de la formation de l'acide sulfurique dans les chambres de plomb. Dans cet ordre d'idées, Berthelot, étudiant la décomposition de l'eau oxygénée et celle des permanganates par le bioxyde de manganèse et les corps poreux, l'expliqua par la production passagère de suroxydes instables, sans cesse reformés par l'eau oxygénée ou par les permanganates. Aussitôt, il rapprocha l'action des diastases de celle des corps poreux, d'autant plus que, d'après M. Le Chartier, certains végétaux qui ne donnent lieu à l'apparition d'aucun germe provoquaient néanmoins des effets chimiques identiques à ceux des levures vivantes.

En 1860, Berthelot, ayant retiré de la levure de bière l'invertine ou sucrase qui dédouble le sucre ordinaire en glucose et lévulose, mais ne pouvant extraire de la levure la diastase qui change le glucose en alcool et acide carbonique, affirma que, pour isoler par lavages cette diastase incluse dans les cellules microbiennes, il fallait préalablement trouver un moyen de déchirer ces cellules. Du vivant de Pasteur, ces idées restèrent sans écho, parce que les découvertes éclatantes et continues faites en biologie accaparaient toute l'attention.

Plus tard, la question fut reprise en Allemagne.

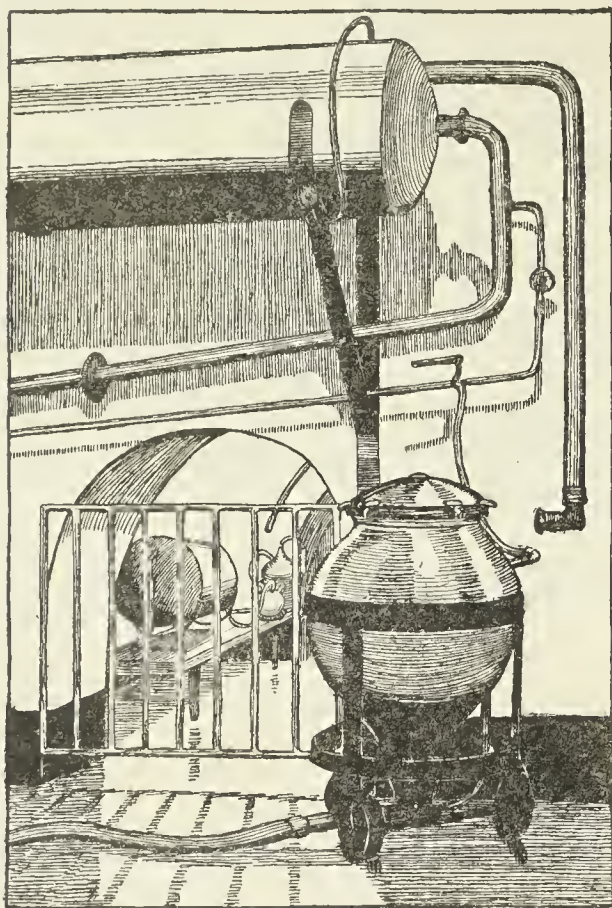
Pour déchirer le tissu de la levure de bière vivante, Buchner en tritura un kilogramme avec son poids de sable quartzeux très fin et deux cent cinquante grammes de terre d'infusoires (tripoli). La masse, devenue plastique, fut additionnée de cent grammes d'eau et comprimée dans un linge à cinq cents atmosphères. Répétant sur le gâteau tamisé la même opération, il rassembla les liquides dont la moitié environ provenait de la levure. La liqueur, filtrée sous pression au filtre Chamberlain, était claire, jaunâtre, et ne renfermait aucun germe vivant. Ajoutée à une solution de sucre de canne, elle en provoquait la transformation immédiate en alcool, sans apparition de germes, par le fait des deux diastases qu'elle renfermait : l'*invertine* et la *zymase* alcoolique, comme Berthelot l'avait prévu.

Du ferment lactique, Buchner a extrait par le même procédé une diastase soluble qui dédouble immédiatement le glucose en acide lactique. Antérieurement, dans le micrococcus ureæ, découvert par van Tieghem, et qui transforme l'urée en carbonate d'ammoniaque, Miquel avait isolé une substance diastasique précipitable par l'alcool. Celle-ci, en dehors de tout effet vital, dédouble immédiatement l'urée en acide carbonique et ammoniaque. Ce sont donc les diastases solubles de Payen et Persoz



CUVES DE FERMENTATION DANS LES CAVES DE LA BRASSERIE DES MOULINEAUX

et non les microbes, qui, dans les fermentations, provoquent des dédoublements chimiques variés et impossibles à prévoir, car aucun rapport, répétons-le, n'existe entre la constitution du composé en fermentation et celle des corps qui en dérivent. L'intérêt de ce sujet s'accroît sans cesse : la découverte des oxydases, faite par Gabriel Bertrand, a révélé à ce savant un mécanisme inattendu résultant du rôle



APPAREIL POUR PROPAGATION DE LEVURE
PURE ET OXYGÉNATEUR POUR AÉRATION
ET ENSEMENCEMENT
(Brasserie des Moulineaux).

des oxydes de manganèse sur ce genre d'oxydations diastasiques. Elle lui a permis de conclure que le pouvoir fertilisant de ces oxydes est lié à l'activité qu'ils communiquent aux oxydases.

Toutes les diastases ne sont pas nécessairement solubles dans l'eau. Le pouvoir saponifiant de la graine de lin, constaté par Pelouze en 1855, est dû à une diastase dont le pouvoir se manifeste vivement au sein des huiles et des graisses, mais disparaît dans l'eau, d'après M. Nicloux, à l'inverse des lipases de M. Hanriot.

On a rapproché naturellement deux ordres de phénomènes dont le mécanisme est semblable : les actions catalytiques et les diastasiques. Ainsi M. Antony Guyard, frappé de l'influence exercée sur la genèse de certaines matières colorantes par des quantités infinitésimales de vanadium, a comparé ce métal à un ferment, et M. Bredig, en 1901, a considéré les solutions colloïdales des métaux comme des modèles

de diastases inorganiques, les unes et les autres ayant un pouvoir catalytique intense.

Mais on ne soupçonnait pas que la virulence des venins était due à l'action chimique de ce genre de toxines, quand MM. Fourneau et Delézenne ont démontré que le venin de cobra dédouble certaines lécithines. Ces composés, si répandus dans l'organisme animal et dont la molécule renferme à la fois de l'acide oléique et de l'acide palmitique, sont rapidement altérés : l'acide oléique est mis en liberté tandis que l'acide palmitique reste en combinaison sous forme de *lisocithine* cristallisée,

douée de propriétés hémolytiques frappantes. Ce beau rapprochement entre la chimie et la biologie démontre nettement la fécondité de la méthode pasteurienne, qui, comme la théorie atomique, aboutit à des résultats inattendus, illimités, montre toute la portée de la chimie et en fait autre chose qu'une monotone méthode de contrôle.

A PPLICATION A LA FIXATION DE L'AZOTE PAR LES PLANTES Les découvertes de Pasteur ont encore élucidé la question de l'assimilation de l'azote par les végétaux. D'après les déterminations analytiques de Boussingault, l'azote contenu dans l'humus résultant des détritux végétaux constitue une réserve où, pour être assimilé, l'azote doit se convertir en nitrates sous l'action de l'air ; comme aussi les sels ammoniacaux. Or, des expériences classiques faites par Kuhlmann, à Lille, sur l'oxydation de l'ammoniaque de l'air en présence de la mousse de platine, on concluait que cette transformation était due à la porosité du sol ; autrement dit que l'oxydation de l'ammoniaque par l'air, premier stade des phénomènes biologiques de la végétation, était un phénomène physico-chimique. Schlœsing père et Muntz ont démontré que la nitrification est au contraire le résultat de la vie d'un microbe dont une température élevée supprime l'action, tandis que le chloroforme la suspend. Ce microbe fut ensuite isolé par le Russe Winogradsky.

Boussingault avait induit, de cultures en atmosphère confinée et d'analyses du sol avant et après la récolte, que l'azote atmosphérique n'intervient pas dans la végétation. Les savants anglais étaient arrivés à une conclusion identique. Cependant on savait que les récoltes des légumineuses renferment parfois plus d'azote que n'en contient le sol, et l'on attribuait ce surplus à l'apport des composés azotés dissous dans les eaux pluviales. Seul G. Ville admettait l'intervention directe de l'azote atmosphérique. Il s'appuyait sur ce fait qu'une luzernière, après avoir prélevé pendant plusieurs années des quantités considérables d'azote, laissait néanmoins la terre plus riche en cet élément qu'elle ne l'était avant l'ensemencement. La doctrine microbienne, appuyée sur les expériences de Schlœsing et Muntz, donna la clef de ces contradictions. Prillieux ayant observé que sur les racines des légumineuses se trouvent des protubérances qui sont de véritables colonies microbiennes, Hellriegel et Wilfarth montrèrent que ces êtres, qui vivent de la plante, absorbent directement l'azote de l'air et le cèdent ensuite aux racines qui l'assimilent par une vraie symbiose. De fait, une terre stérilisée par la chaleur, qui détruit à la fois ces germes et les produits azotés, ne donne, après ensemencement de légumineuses, que des plantes étiolées, incapables d'arriver à maturité. Au contraire, si l'on arrose la terre

stérilisée avec de l'eau dans laquelle on a délayé quelques nodosités microbiennes, les végétaux prospèrent. Plus tard, au Muséum de Paris, Bréal a donné une forme saisissante à ce contrôle. Sur des pois en germination dans un sol stérilisé et privé d'azote par la chaleur, il inocula le bacille de Prillieux en piquant les racines avec une épingle trempée dans les protubérances de la luzerne ; la plante, poursuivant le cycle de son développement, fournit des graines à maturation, véritables semences.

Ainsi s'expliquait le fait signalé par G. Ville. Mais pourquoi la pratique des jachères enrichit-elle en azote un sol exempt de légumineuses ? Boussingault, qui, comme Liebig, niait l'assimilation directe du gaz azote, avait écrit en 1859 : « J'ai constaté que la terre végétale ne renferme pas seulement de la matière morte, mais aussi des germes vivants, des germes qui produisent une végétation souterraine utilisant à son profit une partie des principes fertilisants, comme l'eau pluviale dans laquelle, d'après Bineau, naissent des cryptogames qui fixent l'azote des nitrates et des sels ammoniacaux, fournissant à l'eau la matière organisée qu'elle n'avait pas. » Berthelot et André établirent en effet qu'une terre de composition déterminée gagne de l'azote après trois mois d'exposition à l'air, tandis que MM. Schloësing fils et E. Laurent, en opérant en vase clos, n'observèrent le même résultat qu'en présence d'algues microscopiques dont ils déterminèrent le rôle fixateur d'azote (1890-1891). Toutefois, d'après E. Laurent, celles-ci ne vivent pas à l'état autonome dans le sol.

En résumé, la conclusion de Schloësing et Muntz réapparaît : la fixation de l'azote indispensable à la vie des végétaux résulte d'une action microbienne, non d'une réaction chimique. La symbiose constatée par l'école de Stuttgart en est un cas.

Pourtant, la présence de certains éléments est essentielle à la végétation. D'abord Raulin perçut l'action insoupçonnée de traces de zinc sur le développement de la moisissure ordinaire. Depuis, l'analyse spectrale a révélé la présence de vanadium, de molybdène, de chrome dans certaines cendres ; Grandeau a trouvé le rubidium dans le thé, le café, les betteraves ; Malaguti, l'argent dans les fucus ; Galippe, le cuivre dans de nombreuses espèces. M. Javillier, reprenant les expériences de Raulin, a établi qu'un dix millionième de zinc triple la production d'*aspergillus*, mais devient néfaste à plus hautes doses. Pour le blé, le zinc est un simple stimulant, comme le manganèse qui, d'après M. Bertrand, facilite le jeu des oxydases.

Là ne se bornent point les applications des notions pasteurienues. Déjà Candolle distinguait entre la stérilité et la fatigue d'une terre arable, la stérilité résultant de l'épuisement du sol par enlèvement des matières nutritives, tandis que la fatigue provient de la culture ininterrompue d'une même espèce végétale qui corrompt la

terre par les excréments des racines. Cette sorte d'auto-intoxication, suivant un agronome américain, M. Whitney, explique l'effet des jachères par la dispersion et l'oxydation des toxines élaborées par la récolte précédente ; de plus, l'enfouissement des engrais verts facilite cette oxydation des toxines et apporte au sol des anti-toxines. Le rôle des vitamines, parties vivantes des plantes, dans la nutrition animale aurait alors quelque analogie avec l'action des plantes vertes sur la végétation. Le champ de la chimie de Pasteur s'étend donc chaque jour ; insistons sur ce fait.

VUES ACTUELLES Nous l'avons vu, pour parer à l'insuffisance de l'analyse du sol, on a établi des champs d'expérience ; cependant la détermination du degré d'acidité ou de basicité d'une terre arable s'est imposée. Les recherches des savants italiens, systématisées par M. Menozzi à l'Institut agricole de Milan, expliquent déjà de surprenantes anomalies. Quand, par exemple, les superphosphates sont sans action sur la fertilité d'une terre peu phosphatée, c'est que la nature acide du terrain aggravée par l'acidité du superphosphate est nuisible à la plante ensemencée. L'échec des préparations industrielles de nombreux *azotobactères*, aptes à fixer directement l'azote atmosphérique, relève d'une cause analogue. D'abord ils abondent dans la terre ; puis, comme les microbes nitrificateurs, ces germes paralysés en sol acide et par les excréments des végétaux sont finalement annihilés par les *protozoaires* que favorise ce milieu acide (recherches de M. Russel à Rothamstead, de MM. Kayser, Truffaut etc., en France). On s'explique alors ces cas d'inaction d'engrais ammoniacaux sur certains terrains pauvres en azote : faute de germes nitrificateurs, l'ammoniaque ne s'est pas convertie en produits nitriques assimilables. Le sol végétal apparaît dès lors, non comme un support des végétaux, mais comme un distributeur et un producteur d'engrais. Éclairée sur ce point, l'agriculture s'allégera de son lourd tribut envers l'industrie de l'azote en parachevant l'étude du cycle des actions microbiennes découvert par nos illustres compatriotes Schlœsing et Muntz.

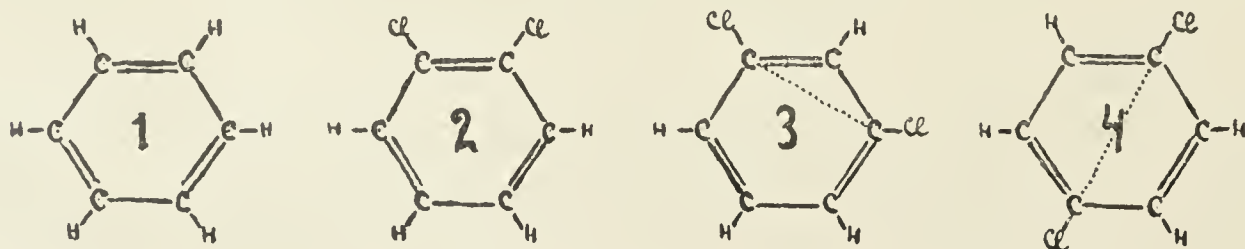
B. I. — LA SÉRIE AROMATIQUE OU CYCLIQUE.

LA BENZINE ET SES HOMOLOGUES L'industrie du gaz d'éclairage, dont l'idée première revient à Le Bon, eut sur la science une répercussion inouïe en fournissant par ses résidus goudronneux des corps nouveaux, nombreux et variés, dont l'étude constitue la chimie des composés aromatiques.

Bien que la subdivision de la chimie en deux séries principales, grasse et aromatique, tende à s'effacer, le rôle de cette dernière fut si grand et a tant aidé à l'exposé de la science, qu'il a sa place dans l'histoire.

Cette branche cadette se rattache à la benzine comme la série grasse se relie au méthane. La constitution de la benzine est donc indispensable à connaître ; d'autant plus qu'elle est la source d'un nouveau genre d'isomérisie de position très important.

Une fois de plus, la théorie a suggéré la solution de cette question ardue, l'expérience se bornant à vérifier la justesse des conceptions. Tout d'abord, l'hypothèse moléculaire conduit à la formule brute C^6H^6 . D'autre part, pour rappeler que ce carbure, si éloigné de la forme saturée, fixe cependant le chlore avec difficulté, et pour représenter ses isomérisies caractéristiques, il fallait une formule spéciale répondant à ces conditions. La condensation, réalisée par Berthelot, de trois molécules d'acétylène en une molécule de benzine sous l'influence persistante d'une température de 400 degrés, ne suffit pas à établir la constitution de ce carbure. Sans doute, l'existence d'un seul produit de substitution monochlorée dénote que, dans cette condensation, chaque groupe acétylénique joue un rôle identique ; mais s'il conservait son individualité, l'expression $[C^2H^2]^3$ correspondrait à deux dérivés bisubstitués $C^6H^4Cl^2$, l'un provenant de l'accumulation du chlore dans un même groupe acétylénique, l'autre de sa répartition entre deux groupes différents. Or, on connaît trois dérivés bisubstitués de la benzine. L'extension logique de la théorie de la valence conduisit Kékulé (Allemand) au symbole hexagonal, qui est irréprochable. Il exprime que dans la benzine six groupes CH sont identiquement soudés l'un à l'autre de façon que les quatre valences de chaque atome de carbone soient pareillement satisfaites. La fixation directe du chlore, si vive dans l'acétylène, devient nécessairement difficile dans un noyau ainsi constitué. L'hexagone étant régulier représente cette identité des groupes CH, car le remplacement d'un seul atome d'hydrogène par un atome de chlore donne lieu à des figures superposables, quel que soit l'atome remplacé. Au contraire la substitution de deux atomes de chlore ou de deux radicaux monovalents correspond à trois figures différentes :



selon que les deux substitutions se font aux extrémités d'un côté (position ortho, fig. 2), d'une corde (position méta, fig. 3) ou d'un diamètre du cercle circonscrit à l'hexagone (position para, fig. 4). Trois isomères bisubstitués et quatre isomères trisubstitués répondent donc à ce symbole hexagonal. L'expérience confirme d'une façon absolue cette déduction.

De plus, le remplacement d'un atome d'hydrogène par le groupe méthyl CH^3 donne un carbure homologue de la benzine, puisqu'il en diffère par CH^3 : c'est le toluène découvert par Deville. Sa constitution fait prévoir l'existence de quatre dérivés monochlorés de ce carbure, suivant que le chlore se placera dans le radical méthyl, ou qu'il occupera par rapport à ce radical les trois positions mentionnées ci-dessus. Précisément, il existe trois composés chlorés dans le noyau benzinique, inaltérables par l'eau alcaline, tandis que le chlore substitué dans le méthyl est remplacé par OH, comme dans tous les carbures gras, et fournit l'alcool toluïque de Cannizzaro.

La benzine présente d'autres particularités. Intact ou modifié par des substitutions, comme dans le phénol, qui est un véritable alcool cyclique, le noyau benzinique résiste aux acides autres que les acides nitrique et sulfurique. Ceux-ci par réduction partielle perdent un oxhydrile OH, qui forme de l'eau avec l'atome H enlevé au cycle benzinique, alors que le résidu acide se substitue à cet hydrogène :



Dans le premier cas, on obtient la nitrobenzine neutre, et, dans le second cas, undérivé phényl-sulfureux qui est acide par l'hydrogène restant de l'acide sulfurique.

L'intervention de ces acides minéraux sur un monodérivé de la benzine, le phénol par exemple, donne trois nitro-phénols, ou trois acides phénolsulfureux, puisque ces composés sont des dérivés de position bisubstitués dont le nombre est réglé par le symbole hexagonal.

Comme le phénol est sans action sur l'acide chlorhydrique qui devrait le transformer en éther correspondant $\text{C}^6\text{H}^5.\text{Cl}$, et comme il possède une tendance acide à laquelle il doit le nom d'acide phénique, on pourrait douter que ce corps fût un alcool provenant de l'introduction de OH dans le carbure. Mais l'action du chlorure de phosphore remplace totalement dans le phénol, comme dans tout alcool, le groupe OH par $\cdot\text{Cl}$, et fournit un composé identique à la benzine monochlorée $\text{C}^6\text{H}^5.\text{Cl}$,

justifiant ainsi la filiation de ces corps. De plus, le phénate de soude, qui donne l'acétate de phényl au contact du chlorure d'acéthyle, fait apparaître une autre propriété caractéristique des alcools.

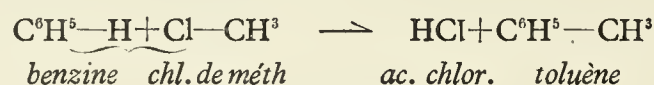
La benzine a surtout attiré l'attention par la transformation de son dérivé nitré en amine basique au contact de l'hydrogène naissant. Ce mode de production de la phénylamine ou aniline $C^6H^5 - NH^2$, dû au Russe Zinin, a été l'origine de la fabrication des matières colorantes artificielles, en particulier du rouge Renard (ou fuschine), fabriqué par Verguin à Lyon (1859).

HOMOLOGUES DE LA BENZINE Pour élucider la question des colorants, il faut connaître la constitution des homologues de la benzine, dont la forme générale est par définition $C^6H^6, n CH^2$.

Ce problème a été tranché par la méthode de Wurtz appliquée par Fittig et Tollens au mélange équimoléculaire de benzine iodée et d'iodure de méthyle,

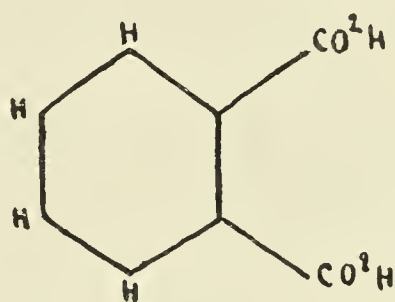


puis par la méthode de Friedel et Crafts, appliquée par M. Istrati (Roumain) à la formation des éthyl-benzines, et qui consiste à faire barbotter les chlorures d'alkyles dans de la benzine contenant un peu de chlorure d'aluminium, qui agit comme catalyseur :

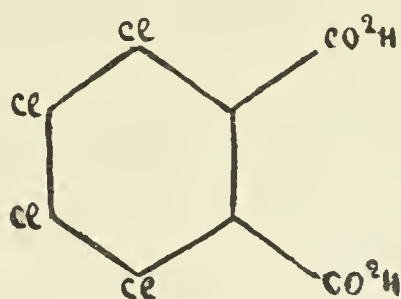


De cette façon on obtient tous les homologues, méthylés, éthylés, etc..., de la benzine ou du toluène, et l'on voit que les homologues de la benzine sont des carbures mixtes qui procèdent à la fois de la benzine et des alkyles. Cette distinction présente un grand intérêt : l'alcool benzylique $C^6H^5 - CH^2.OH$, renferme, comme l'esprit-de-vin, le radical caractéristique des alcools primaires. En perdant H^2 par oxydation modérée, il donnera un aldéhyde. Or, celui-ci constitue un produit précieux, l'essence d'amandes amères, dont on comprend alors la production en partant du toluène extrait du goudron de la houille. Ce carbure, transformé en dérivé monochloré saponifiable par la potasse étendue, puis oxydé, donne l'essence synthétique de Grimaux. Le produit bichloré $C^6H^4.CH.Cl^2$, sous l'action de l'oxyde de plomb PbO , laissera remplacer Cl^2 par l'oxygène O , fournissant ainsi très pratiquement l'essence d'amandes amères.

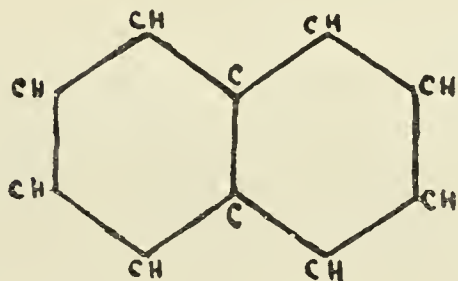
POLYBENZINES Par ses synthèses pyrogénées, Berthelot prépara un grand nombre d'autres carbures aromatiques qu'il étudia et qui se révélèrent fort différents des homologues de la benzine. Parmi ces carbures, arrêtons-nous seulement à la naphthaline et à l'anthracène, corps résultant de la juxtaposition de plusieurs noyaux benzyniques. La constitution de la naphthaline a été tirée de l'oxydation modérée de ce carbure qui fournit un acide bibasique très important, l'acide phtalique. Le dérivé tétrachloré de la naphthaline, obtenu par Laurent, donnant à la fois par oxydation cet acide et son produit tétrachloré, a fait admettre que l'oxydation du noyau chloré donne l'acide phtalique :



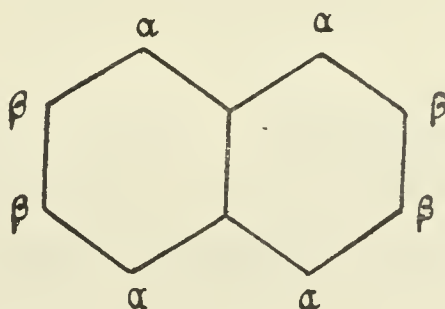
tandis que



résulte de l'oxydation du noyau chloré de la naphthaline figurée par :

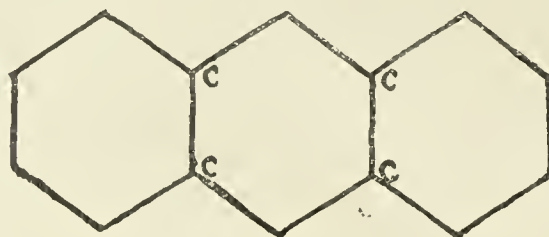


ou par



Cette constitution symétrique dénote l'existence de deux naphtols, véritables phénols naphthaliques, suivant que l'on substitue le radical OH dans un des quatre sommets figuratifs α voisins de la soudure, ou selon que la substitution se fait en β dans l'un des quatre sommets également éloignés de la soudure. Ces deux naphtols existent effectivement, et leurs propriétés médicales et colorantes ne sont pas les mêmes. Ajoutons que l'acide phtalique s'obtient encore par oxydation de l'orthoxylène, tandis que les isomères de ces carbures donnent les acides métaphtalique et paraphtalique, qui n'ont ni le même point de fusion ni la même chaleur de neutralisation. Enfin l'anthracène résulte d'une triple condensation de la benzine, comme l'a indiqué M. Græbe. Ce carbure plus compliqué pré-

sente naturellement un plus grand nombre d'isomères de position que la naphthaline, comme le dénote l'aspect de sa formule schématique qui renferme dix groupes CH :



Extraite pratiquement du goudron du gaz, comme la naphthaline, son importance date de son emploi à la synthèse de l'alizarine de la garance, qui est un phénol. Mais pour introduire cette fonction dans ces carbures polybenzéniques, il est impossible de réagir au moyen de l'eau alcaline sur les produits chlorés ; il faut, comme l'a imaginé Wurtz, attaquer le noyau par l'acide sulfurique concentré, puis détruire le composé phénylsulfureux ainsi obtenu par la potasse en fusion ignée ; il se forme un sulfite de potasse qui est un phénol anthracénique.

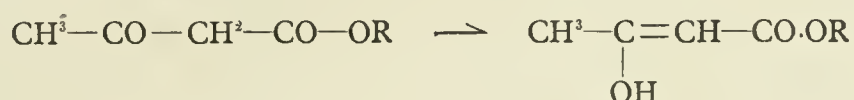
En somme, dans la série aromatique, les formules sont intuitives comme dans la série grasse ; les mêmes radicaux fonctionnels interviennent, les moyens de réaliser leur introduction dans la molécule hydrocarburée sont seuls différents.

FONCTIONS PAR INFLUENCE Les qualités d'un groupe fonctionnel changent sous l'influence des radicaux qui l'entourent. Depuis longtemps on s'était aperçu que le phénol trinitré devenait un acide énergique, capable de décomposer les azotates : l'acide picrique. Cette influence des groupes à tendances acides sur les radicaux fonctionnels existe aussi dans la série grasse. Par exemple, en introduisant le radical acyle CH^3CO de Gerhardt dans le groupe CH^3 de l'acide acétique $\text{CH}^3-\text{CO}^2.\text{H}$ (ou mieux de ses éthers), les deux atomes d'hydrogène du groupe CH^2 encadrés par l'acyle et par le radical acidifié CO^2R , agissent dans $(\text{CH}^3.\text{CO})-\text{CH}^2-[\text{CO}^2\text{R}]$ comme H^2 dans les acides bibasiques SO^4H^2 ou $\text{C}^2\text{O}^4\text{H}^2$.

Alphonse Combes, en appliquant la méthode de Friedel et Crafts au chlorure d'acétyle, a provoqué, par l'action du chlorure d'aluminium, une condensation de trois molécules du chlorure organique qui, au contact de l'eau, se change aussitôt en acétylacétone $[\text{CH}^3\text{CO}]-\text{CH}^2-[\text{CO}.\text{CH}^3]$. Dans ce corps, où CH^2 est encadré par deux groupes acyles, l'hydrogène central prend, sous leur influence, des tendances acides ; en réagissant sur les oxydes métalliques, il donne même avec

l'alumine un acétyl-acétonate volatil à 300 degrés, dans lequel l'aluminium agit comme trivalent.

Ce n'est pas tout ; car, sous l'action d'un froid intense, on constate que l'éther acétylacétique, qui est saturé, donne un isomère particulier non saturé, dit énoïque, par migration d'un des atomes d'hydrogène du groupe central CH^2 :

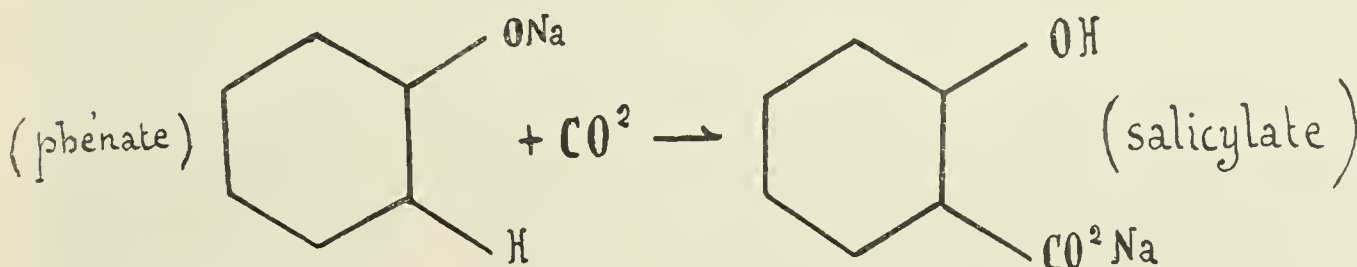


Cet énoïl n'est plus saturé, car il fixe directement deux atomes de brome.

MIGRATIONS

De tels phénomènes sont assez nombreux en chimie.

La synthèse industrielle du salicylate de soude, opérée par M. Schlumberger de Mulhouse, en est un exemple remarquable. Le phénate de soude, chauffé à 180 degrés au contact de gaz carbonique sec, se transforme en salicylate par double migration d'un atome de l'hydrogène du noyau benzylique et de l'atome de sodium du groupe phénate ONa .



Ces migrations atomiques témoignent de l'insuffisance de la théorie des valences fixes pour exprimer tous les faits. Comme nous l'avons remarqué, la valence n'est en effet que l'expression de la loi des proportions multiples adaptée aux composés essentiels et les plus nombreux d'un élément donné : l'azote, trivalent dans les amines, pentavalent dans les sels de ces bases, est bivalent dans le bioxyde d'azote NO . Cette multivalence se constate mieux encore sur les éléments métalliques, et le choix de la valence essentielle est resté une des grandes difficultés de la classification des métaux.

La chimie des complexes, par un retour aux idées de Dumas, nous fournira d'autres exemples de cette insuffisance d'une théorie pourtant si féconde.

B. II. — LA GRANDE INDUSTRIE ORGANIQUE

G^{AZ} D'ÉCLAIRAGE Philippe Lebon (1767-1804) était, comme Gay-Lussac, un ingénieur des ponts et chaussées épris de science. Pour étudier les gaz de la distillation du bois, il les emmagasina dans un gazomètre, et reconnut qu'ils étaient à la fois propres à l'éclairage et au chauffage. Encouragé par Fourcroy dans ses recherches, il les étendit à la houille et breveta, en 1799, un appareil susceptible de distiller indifféremment le bois et la houille. Dans un opuscule publié en 1801, il affirmait que cet appareil procurait un chauffage et un éclairage économiques, des produits précieux et une force motrice applicable aux machines. En même temps, il décrivait les procédés d'épuration nécessaires et le principe des longues canalisations. Aucun des avantages de son invention n'avait échappé à sa perspicacité. Ayant en vain sollicité le gouvernement de l'appliquer à l'éclairage des villes, il fit des expériences publiques à Paris, éclairant l'ancien hôtel Seignelay, ses cours et ses jardins. Il installait ses appareils au Havre quand il fut assassiné, en 1804, au retour de la cérémonie du sacre de Napoléon, à laquelle il assistait en qualité d'ingénieur en chef.

Telle est l'origine de cette belle et grande industrie du gaz, qui se répandit dans le monde entier, transformant l'éclairage, les modes de chauffage et les moteurs à feu. Il était cependant impossible de prévoir que la production du gaz passerait au second plan pour laisser aux *résidus précieux* de Lebon un rôle prépondérant dans la pratique et dans la science. Nous avons déjà mentionné que la chimie des corps aromatiques provenait de cette source.

L'appareil à colonne distillatoire, employé dans la rectification des alcools et dans celle des pétroles, s'applique à l'extraction de l'ammoniaque diluée dans les eaux de lavage du gaz d'éclairage et à la récupération de cette base dans le procédé Solvay. Pour les goudrons, l'appareil de Coupier sépare, entre 75 degrés et 150 degrés, la benzine et ses homologues : le toluène, les xylènes, parties principales des huiles légères ; puis, entre 150 degrés et 250 degrés, les huiles moyennes dont on retire l'aniline et le phénol avec ses homologues, les crésols solubles dans la soude. Enfin dans les huiles lourdes, qui passent entre 250 degrés et 350 degrés, on trouve la naphthaline et l'anthracène. Disons les emplois de ces corps.

Collas, parfumeur à Paris, s'attacha à transformer la benzine en nitrobenzine par l'action de l'acide azotique. Il utilisait ce corps comme succédané de l'essence



DÉCOUVERTE DU GAZ D'ÉCLAIRAGE PAR PHILIPPE LEBON
Expérience à l'Hôtel Seignelay (An X)

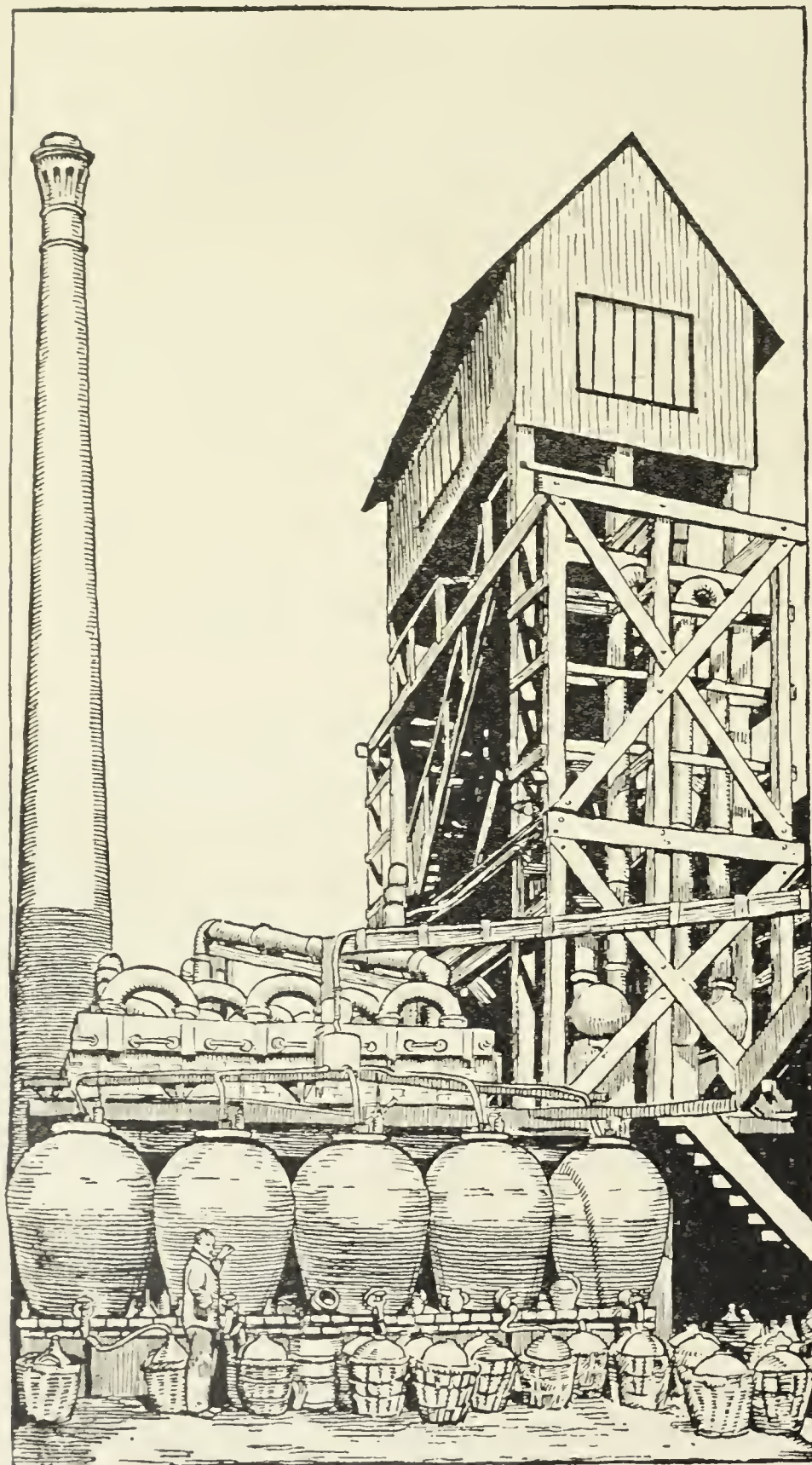
d'amandes amères, sous le nom d'essence de mirbane. Mais après la découverte de l'aniline par le Russe Zinin, et surtout après l'application de cette base à la fabrication des couleurs, Béchamp indiqua le moyen de transformer intégralement ce produit nitré en aniline en le réduisant par la limaille de fer et l'acide acétique. Ce procédé a fourni les énormes quantités d'aniline consommées dans l'industrie jusqu'à son remplacement récent par l'action réductrice de la limaille de fer sur l'eau chaude acidulée pour amorcer la réaction.

L'industrie du phénol et celle des crésols prit un essor comparable à celui de la benzine à partir de la découverte par Turpin de la mélinite, dont le constituant est l'acide picrique. Chevreul avait étudié cet acide, connu au dix-huitième siècle sous le nom d'amer de Welter ; puis Laurent l'avait rattaché directement au phénol par une triple nitration. Dès 1849, Guinon se servit du procédé de Laurent pour monter à Lyon la première fabrication de couleurs artificielles, basée sur la teinte jaune que communique l'acide picrique à la soie et à la laine. Ce fut encore Guinon qui, en 1859, appliqua le phénol à la fabrication de l'acide rosolique de Persoz, l'année où les frères Renard, dans la même ville, fabriquaient la fuchsine découverte par Verguin.

Dans l'intervalle, on utilisait les picrates, violents explosifs particulièrement sensibles à l'action de la chaleur, tandis que l'acide picrique pur, enflammé, brûle progressivement. Turpin, en soumettant ce dérivé nitré au choc puissant des amorces de fulminates, provoqua sa brusque décomposition, et en fit à la fois le plus maniable et le plus terrible des explosifs : la mélinite. Son explosion ne correspond cependant pas à une combustion complète, la formule $C^6H^3(NO^3)^3O$ indiquant qu'il ne renferme que sept atomes d'oxygène, alors qu'il en faudrait quatorze pour transformer tout son charbon en acide carbonique et tout son hydrogène en eau. Ce fait explique la supériorité de cet explosif sur ses homologues les trinitrocrésols et le trinitrotoluène (tritolo des Italiens), qui, contenant une moindre proportion d'oxygène, donnent lieu à de moindres expansions gazeuses. Avant la guerre, la mélinite se faisait en partant du goudron de la houille ; dans la période des hostilités, la production du gaz d'éclairage et celle des fours à coke, sources de goudrons, se trouvant ralentie, le phénol fut fabriqué par synthèse à l'aide de benzine transformée en phénol par les réactions synthétiques de Wurtz et de Dessaignes.

MATIÈRES COLORANTES

Encore une fois, ce fut l'invention de Lebon qui suscita celle des matières colorantes. Les recherches synthétiques qui, pendant longtemps, n'avaient visé que la vérification des théories



FABRICATION D'ACIDE CHLORHYDRIQUE (Société des matières colorantes à St-Denis).

nouvelles, prirent une allure utilitaire avec les découvertes de Perkin et de Verguin. En 1859, Verguin, ayant découvert la fuchsine, établit à Lyon une fabrique de ce produit à l'usine Renard. Ce rouge éclatant qui, outre son grand pouvoir colorant, se fixait directement sur la soie et la laine, supprimait les coûteuses opérations du mordantage et modifiait profondément l'art du teinturier. Aussi son prix élevé (au début 3 000 francs le kilo) et l'irrégularité de sa fabrication ne firent pas obstacle à sa propagation. Progressivement d'ailleurs, ce prix s'abaissa à 30 francs, quand, à la suite des recherches de savants comme Rosenstiel et Noeltling (Alsaciens), on s'aperçut que la fuchsine n'était pas un dérivé de l'aniline

pure, car les rendements augmentaient à mesure que l'on ajoutait à cette base des quantités croissantes de son homologue, la paratoluidine, véritable noyau de la fuchsine. Le carbure fondamental des couleurs d'aniline, le triphénylméthane, résulte en effet de la substitution de deux radicaux phényl C^6H^5 dans le chaînon CH^3 du toluène, ou pratiquement du remplacement du chlore par trois groupes C^6H^5 dans le chloroforme $CHCl^3$ par la méthode de Friedel et Crafts. Le triphénylméthane, nitré puis réduit par l'hydrogène, donne la rosaniline ou fuchsine.

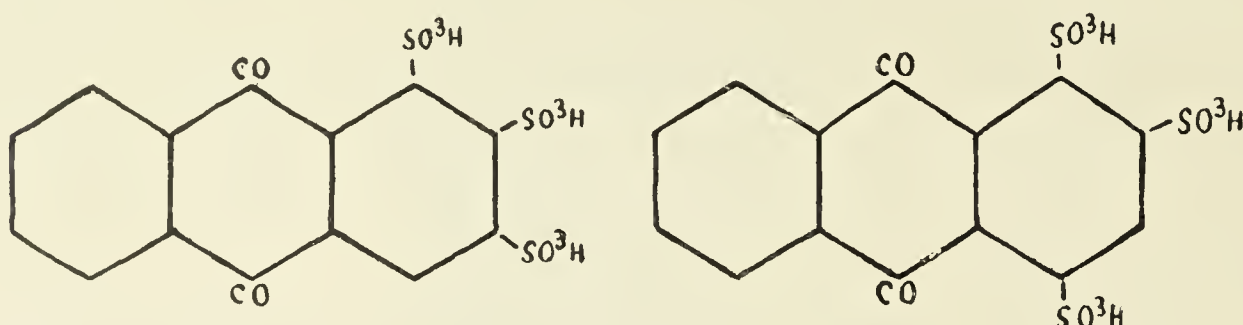
Dans l'intervalle, Lauth découvrait le violet méthylé ou violet de Paris en 1861, Ch. Girard et de Laire appliquaient l'acide arsénique à la fabrication de la fuchsine, trouvaient la violaniline, le bleu de Lyon, la mauvaniline et le bleu de diphénylamine entre 1860 et 1866 ; tandis que Bardy réalisait industriellement, chez Poirrier à Saint-Denis, la fabrication des diméthylanilines et de la phénylaniline, dont l'importance n'a cessé de croître. Ce furent encore deux chimistes français, Croissant et Bretonnière, qui découvrirent, en 1873, les couleurs au soufre, si résistantes à la lumière et aux agents atmosphériques, capables en outre de teindre directement le coton sans mordant.

Lauth complétait la liste de ces colorants sulfurés par la découverte des thionines, et Cherpin fabriquait à Saint-Ouen son vert à l'aldéhyde. Enfin, par l'extraction du chlorure de méthyle des vinasses de betterave, C. Vincent apporta un concours précieux à la fabrication des nombreux colorants méthylés.

Toutefois l'adaptation intégrale des théories modernes à la fabrication industrielle d'une matière naturelle utilisée dans les arts date de la synthèse de l'alizarine réalisée par Graebe et Liebermann. Exposons cette découverte, qui a fait entrer la synthèse en maîtresse dans les applications, comme Chevreul y avait fait entrer l'analyse.

Tout d'abord, l'alizarine et la purpurine, extraites de la garance par Robiquet et Colin, sont des colorants cristallisés parfaitement définis. Le plus abondant est l'alizarine, dont l'analyse indique des proportions de carbone, d'hydrogène et d'oxygène conformes à la formule $C^{14}H^8O^4$. Avant de procéder à la reconstitution de ce corps, il fallut connaître les radicaux et surtout le carbure fondamental que la théorie lui attribue. Or, par distillation sèche en présence du zinc en poudre, M. Graebe a constamment observé la formation d'anthracène $C^{14}H^{10}$ et d'anthraquinone $C^{14}H^8O^2$. Le premier de ces corps abonde dans les huiles lourdes du goudron de la houille et se rattache à l'anthraquinone par oxydation ; cet oxyde constitue d'ailleurs une nouvelle fonction (acétone intracyclique) qui fut précisée par la même occasion. Le *démontage* de la molécule d'alizarine dénote donc la présence d'un noyau d'antra-

cène et probablement celle de son produit d'oxydation. En comparant la formule de celui-ci $C^{14}H^8O^2$ à celle de l'alizarine $C^{14}H^8O^4$, on aperçoit qu'ils diffèrent par une addition de deux atomes d'oxygène. Or, l'alizarine n'étant pas acide, cette oxydation résulte vraisemblablement du remplacement de deux atomes H par deux radicaux (OH), c'est-à-dire de l'introduction de deux fonctions phénoliques dans le noyau de l'anthraquinone. Précisément, la méthode de Wurtz (attaque du carbure par l'acide sulfurique concentré, suivie de l'action de la potasse en fusion) réalise cette transformation. Naturellement, si on fait intervenir un excès d'acide sulfurique, on forme deux dérivés trisulfonés



qui donnent, par réaction sur la potasse, des trioxyanthraquinones ; le premier est la purpurine, et le deuxième le brun d'alizarine, qui n'existe pas dans la garance. La chimie va donc plus loin que la nature.

Ce travail magistral remettait en lumière les publications de Roussin sur un colorant voisin de la naphthaline. Laurent avait démontré que ce carbure engendre des matières colorantes, et Gerhardt le considérait comme le noyau fondamental de l'alizarine, que l'oxydation rattache à l'acide phtalique. Dès 1861, par action de la grenaille de zinc à 200 degrés sur une dissolution de binitro-naphthaline dans l'acide sulfurique, Roussin obtenait une matière colorante rouge, sublimable, de propriétés chimiques et tinctoriales analogues à celle de l'alizarine : la naphthazarine, possédant les mêmes fonctions que l'alizarine ; c'était la dioxynaphtaquinone, tandis que l'autre est la dioxyanthraquinone, comme le constata plus tard Liebermann, l'un des inventeurs de l'alizarine. Par un scrupule commun à beaucoup de savants français, Roussin, professeur au Val-de-Grâce, estimait que ses fonctions officielles ne lui permettaient pas d'exploiter industriellement sa découverte, mais justifiaient la continuation de ses recherches. L'obtention des nitronaphtalines à l'état de pureté et son procédé de réduction de ces corps par l'étain et l'acide chlorhydrique avaient été pour lui une entrée dans la voie des applications de la naphthaline qui n'était alors

que le déchet le plus abondant, d'ailleurs inutilisé, de la fabrication du gaz. Après s'être aperçu que la naphtarazine donnait par oxydation le β naphthol, il établit que les deux naphtylamines isomères α et β se comportent d'une manière très différente, et que la réduction des dérivés nitrés correspondants donne lieu à des réactions qui rappelaient celles des dérivés azoïques tirés par Griess de la benzine. Roussin conçut alors toute la série des dérivés azoïques de la naphthaline, source actuelle de milliers de corps colorants; et il découvrit comment la production directe des colorants azoïques sur les fibres réfractaires, telles que le coton, détermine la fixation mécanique, mais très nette, des produits ainsi formés sur la fibre. Ce fut en 1875 que Roussin trouva les orangés fabriqués à l'usine Poirrier, et le rouge de naphtylamine dont l'existence contredisait l'opinion accréditée que la méthode de Griess donne exclusivement des matières colorantes jaunes. En 1877, le rouge solide ou roccelline, dans lequel pour la première fois le β naphthol est utilisé, marque une suite de découvertes industrielles illimitée et constatée par les nombreux brevets successifs de Roussin, tantôt seul, tantôt avec Rosensthiel et Poirrier. Tous les dérivés simples ou mixtes de la naphthaline furent diazotés. Malheureusement, affirme Lauth dans son rapport sur l'exposition de 1878, il fallait une armée de chimistes pour suffire à ce travail de préparation. Or, l'Allemagne seule, par l'organisation de ses usines et de ses laboratoires, possédait cette force qui lui permit de dominer notre industrie des matières colorantes. Cette constatation détermina la création par Schutzenberger et Lauth de l'École de chimie et de physique, dont les élèves ont rendu tant de services pendant la Grande Guerre.

Quelques explications théoriques sont nécessaires pour éclaircir la question des colorants azoïques. Le chimiste Dessaignes (1800-1885), receveur municipal de la ville de Vendôme, auteur de multiples recherches d'analyse immédiate, après avoir établi les relations qui lient entre eux les acides succinique, malique et tartrique, indiqua la réaction très simple et très importante par laquelle on peut transformer intégralement la benzine en phénol. Vers 100 degrés, l'aniline, tirée de la benzine comme nous l'avons vu, se change en phénol sous l'action de l'acide azoteux avec dégagement d'eau et d'azote :



Pratiquement, on fait intervenir le chlorhydrate d'aniline et l'azotite de soude, corps stables et maniabiles. Au lieu d'opérer à 100 degrés, Griess fit cette réaction

dans la glace, l'arrêtant quand les deux atomes d'azote sont soudés par l'échange de deux valences $C^6H^5-N=N-OH$. Le produit résultant est l'azoïque, qui se combine directement au phénol et à ses dérivés pour donner la série des colorants jaunes de Griess, de Kékulé, de Witt et Caro ; mais encore une fois aucun de ces chercheurs ne soupçonnait la possibilité de fabriquer des rouges avant l'apparition, en 1876, du *rouge solide* de la *Badische*. Or, c'était le composé que Roussin avait obtenu trois ans plus tôt et dont l'apparition avait démontré que les couleurs azoïques n'étaient pas nécessairement jaunes. Il avait suffi au chimiste français de poursuivre depuis 1861 ses idées sur l'acide *naphthionique*, les naphthols et leurs multiples dérivés, sans suivre la trace de personne. L'analyse de ses produits en révéla la constitution aux Allemands et en porta chez eux la fabrication.

Revenons aux couleurs d'aniline. Dans les couleurs azoïques, le groupement de deux atomes d'azote $-N=N-$ détermine le pouvoir colorant ; mais la nature des radicaux fixés sur ce groupe influe du tout au tout sur la couleur et les propriétés du produit, comme Roussin l'a montré. Dans les colorants alizariques, l'anthracène et la naphthaline constituent le radical hydrocarboné fondamental de la matière colorante. Dans le groupe de l'indigo, M. Baeyer a établi que ce radical était un carbure mixte : l'indol, qu'il a rattaché aux dérivés orthosubstitués de la benzine, comme MM. E. et O. Fischer, Graebe et Caro, Rosensthiel, avaient relié la fuchsine au triphénylméthane. D'autre part, l'essence d'amandes amères dérivant du toluène $C^6H^5-CH^3$, il est possible de rattacher à cette essence des composés colorés en y remplaçant l'atome d'oxygène par deux radicaux monovalents identiques dérivés du phénol ($-C^6H^4.OH$). De fait, en condensant, par perte d'eau, deux molécules phénoliques sur l'essence d'amandes amères, on obtient la série des aurines, très belles couleurs rouges et non azotées. De là, les perfectionnements continuels de la fabrication synthétique de l'essence d'amandes amères que le premier réalisa Grimaux.

Ces colorants, dont la valeur annuelle se chiffre en francs par centaines de millions, sont le résultat direct des théories de l'école française. Négligées dans notre enseignement, elles ont été pour les étrangers une source de richesses dont nous voudrions montrer toute l'importance et la variété.

PARFUMS Depuis longtemps l'extraction du parfum des plantes existe dans nos départements méridionaux, mais cette industrie est en voie d'évolution ; il s'agit, outre la recherche de dissolvants convenables ou de procédés de distillation délicats, de reproduire les parfums naturels, ou de faire de nou-

veaux produits artificiels par voie synthétique totale ou partielle. Comme pour les corps colorés, des remarques générales guident le chimiste. Dans la série grasse, l'éthérification des alcools par les acides produit le parfum de la bergamote, celui de l'ananas, l'arome des eaux-de-vie (rhum, kirsch), etc... Dans la série aromatique, les aldéhydes ont des odeurs agréables ou pénétrantes ; donc l'introduction de ces fonctions dans une molécule à tendances odorantes en accentuera l'odeur. Ainsi Cahours et Grimaux ont rattaché à la série benzénique certains parfums estimés, comme l'essence d'anis, celle de vanille, celle d'amandes amères, etc. Ces recherches ont été pour beaucoup dans l'épanouissement de la chimie des corps aromatiques. Ce n'est pas toujours une synthèse que l'on tente : le plus souvent on transforme un produit commun ou peu coûteux en une matière de qualité supérieure. Ainsi le parfum subtil de l'héliotrope est tiré du goudron de bois par l'intermédiaire du gaïacol, dont la synthèse a d'ailleurs été faite par M. Béhal. D'autres fois on modifie l'odeur d'un corps par l'action de la potasse, qui détermine des migrations de radicaux décrites par Grimaux.

L'essence de térébenthine fournit des exemples de ces effets d'isomérisation.

TÉRÉBENTHINE ET CAMPHRES La térébenthine est utilisée directement dans la fabrication des vernis et des encaustiques ; le camphre l'est surtout dans celle du celluloïd sous toutes ses formes.

Le camphre ordinaire ou camphre du Japon se rattache par oxydation au camphre de Bornéo ou bornéol, étudié par Pelouze. Berthelot l'a caractérisé comme un alcool dont l'éther chlorhydrique n'est autre que le chlorhydrate de camphène, obtenu indirectement par l'action du gaz chlorhydrique sur l'essence de térébenthine lévogyre, provenant de la distillation de la résine du pin maritime des Landes, ou de l'essence dextrogyre provenant du pin d'Australie. La première, analysée par Dumas, renferme un carbure spécial isomère, le pinène $C^{10}H^{16}$, qui constitue la majeure partie de l'essence initiale. Bien qu'il joue un rôle capital dans les emplois de la térébenthine, le pinène n'a été isolé que récemment par M. Darmois, qui en a provoqué la congélation par l'action prolongée d'une température de 50 degrés au-dessous de zéro. Les études persévérantes de Berthelot, Riban, Bouchardat et Lafon avaient démontré l'existence de plusieurs isomères térébenthiniques, camphènes et terpènes. Si l'on sature de gaz HCl sec l'essence bouillant à 156 degrés, on forme un corps solide, cristallisé, qui sent le camphre sans en avoir la composition, car il est formé par addition d'une molécule de pinène et d'une molécule H Cl (Laurent). Si l'on tente d'arracher l'acide chlorhydrique au composé $C^{10}H^{16}$, H Cl, séparé des liquides résiduels,

en le chauffant par exemple avec de l'aniline à 184 degrés, on régénère un carbure de constitution $C^{10}H^{16}$; mais ce n'est pas le pinène, c'est un isomère solide, le camphène, ainsi nommé par Berthelot parce qu'il put le transformer en camphre par oxydation, réaction impossible en partant du pinène. Ce dernier s'est donc isomérisé sous l'action du gaz H Cl. Pratiquement ces constatations des chimistes français guident la marche économique de la transformation en camphre de l'essence de térébenthine. Le chlorhydrate de camphène est fabriqué à la température de la glace fondante, puis isolé, et changé en éther acétique ou en éther formique. L'oxydation de ces éthers par un mélange de bichromate potassique et d'acide sulfurique donne le camphre artificiel, qui diffère uniquement du camphre du Japon par l'absence de pouvoir rotatoire ; le celluloid qui en résulte conserve par simple mélange avec le fulmicoton toutes ses qualités essentielles.

Ainsi, dans cette question capitale de la production industrielle du camphre, œuvre de la science française, mise au point dans les usines De Laire, on ne se préoccupe pas de la formule de constitution du pinène, mais du simple fait que ce carbure se transforme en chlorhydrate ou autres éthers du bornéol, oxydables à la façon de cet alcool lui-même. Le bas prix de l'essence et sa richesse en pinène entrent seuls en considération. Dans ce cas particulier, ce n'est pas la connaissance approfondie de la constitution du camphre qui a inspiré l'industrie. Malgré la synthèse de l'acide camphorique de M. Haller, celles du thymol et des alcools terpéniques par M. Béhal et les recherches de M. Blanc, la synthèse totale du camphre ne fut que plus tard réalisée en Finlande par Kompa. De même une formule, comme celle de Bredig, par exemple, explique, sans les avoir devancées, la transformation de la térébenthine en pentane constatée par Berthelot, et les isomérisations dont relèvent les beaux travaux de Bouchardat sur les terpènes.

Bouchardat et Lafon ont, par l'acide acétique, transformé à la longue la térébenthine en terpène lévogyre et en éther acétique du bornéol gauche. La même opération donne les isomères dextrogyres avec l'essence d'Australie. Ces faits sont intéressants, car le terpène gauche se rencontre dans la menthe de Russie, tandis que le terpène droit constitue la presque totalité de l'essence d'orange et existe dans celle de citron, de carvi, de bergamote, etc. Les remarquables travaux de Barbier et de Bouveault ont en outre mis en lumière la parenté des terpinéols avec l'essence de géranium (géraniol). Cet alcool éthylénique a pour aldéhyde le citral, ou essence de citron. Or, la condensation avec perte d'eau de l'acétone ordinaire sur le citral fournit à ces savants un produit cyclisable, noyau de l'ionone ou essence de violettes artificielle. La synthèse de ce produit extrêmement recherché

en parfumerie, et dont le prix atteignit 40 000 francs le kilogramme, était ainsi réalisée. Ce beau résultat ne nécessitait qu'une très modeste installation.

RÉSINES ET CAOUTCHOUC Les résines sont nombreuses, parfois mal définies quoique très employées. Quelques-unes sont fossiles, comme l'ozokérite ; mais la plupart proviennent de la sève des plantes : le baume de Judée, le copal, l'élémi..., sont de provenance africaine ou asiatique. et servent à faire les vernis usités dans la carrosserie. Plus que ces corps, le caoutchouc est important. Depuis le développement de l'automobilisme, sa consommation mondiale dépasse un milliard de francs (prix d'avant-guerre). Cette résine provient de la coagulation de la sève de certains arbres tropicaux, comme l'essence de térébenthine qui, distillée, abandonne la colophane. Ce n'est d'ailleurs pas la seule analogie qui existe entre ces matières. Le caoutchouc naturel est dur ; il acquiert sa flexibilité et son élasticité par une incorporation de soufre (vulcanisation). Comme la colophane, il est un polymère de l'essence de térébenthine, répondant à la composition $C^{10}H^{16}$, corroborée par Bouchardat, dont les travaux ont montré la possibilité de la synthèse du caoutchouc. En distillant ce produit, Bouchardat avait obtenu un carbure, l'isoprène C^5H^8 , qui possède deux doubles liaisons et, par elles, se polymérise avec la plus grande facilité sous l'action des acides étendus, en donnant une résine élastique qui a la composition du caoutchouc. Le problème industriel consistait donc à produire économiquement l'isoprène, puis à le polymériser. Le dédoublement du pinène, la transformation des érythrènes extraits de l'aldol ou du gaz portatif, la distillation des vieux caoutchoucs hors d'usage, l'appoint de quelque fermentation visqueuse laissaient entrevoir la possibilité de résoudre cette question, ce qui aurait donné à l'usine productrice le monopole de cette matière. Poursuivie en Allemagne avec la puissante organisation et les capitaux dont dispose l'industrie chimique dans ce pays, les résultats obtenus avant la guerre portaient à penser qu'une solution pratique surgirait de nécessités impérieuses appuyées par des subventions illimitées. Il n'en fut rien et la principale source du caoutchouc est encore la sève des plantes tropicales.

MÉDICAMENTS L'identité des produits naturels et des produits de synthèse démontre sans conteste que les propriétés des corps ne dépendent pas de leurs modes de réalisation. Si l'agencement de certains

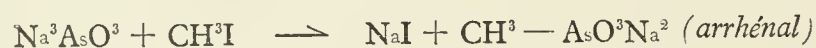
groupements colorants, odorants ou curatifs intéresse les spécialistes, il arrive que ces propriétés se rencontrent dans un même corps : l'acide picrique, par exemple, est colorant et explosif grâce à NO^2 , et antiseptique parce qu'il renferme le radical (OH) phénolique.

Indiquons la genèse d'un groupe de médicaments. Armand Gautier ayant constaté la présence de l'arsenic dans l'organisme animal, M. G. Bertrand mit ce fait hors de doute par la combustion directe des matières organiques par l'oxygène dans la bombe calorimétrique, éliminant les soupçons relatifs à l'apport de l'arsenic par les acides employés jusque-là pour détruire ces matières. Cette diffusion de l'arsenic dans toutes les parties de l'organisme impliquait son existence à l'état infinitésimal. Elle suggéra à Gautier l'idée de généraliser l'emploi si ancien des composés arsénicaux, en diminuant leur toxicité ; il préconisa les cacodylates.

En distillant un mélange d'acide arsénieux et d'acétate de potasse, Cadet avait obtenu un liquide d'odeur repoussante, bouillant à 150 degrés, dont Bunsen tira au siècle dernier le chlorure de cacodyle. Quant à l'acide cacodylique, on le prépare par oxydation de celui-ci :

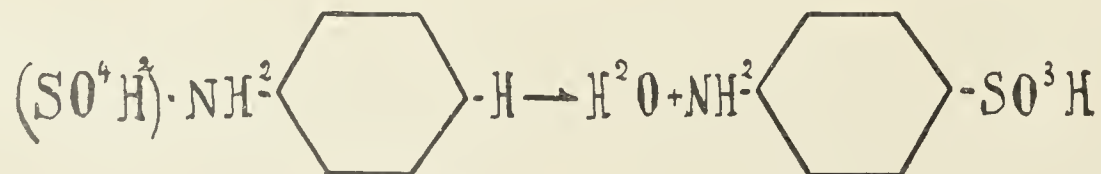


Ses sels alcalins sont inodores, solubles et peu toxiques. La présence d'alkyles dans la molécule arsénieuse produisant bon effet, fut généralisée par l'action de CH^3I sur l'arsénite de soude et fournit l'arrhénil :

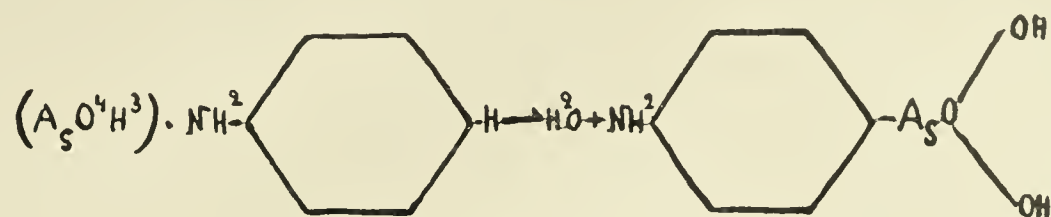


L'efficacité des produits arsenicaux contre le paludisme a provoqué l'extension de ces remèdes, qu'accentua l'introduction des radicaux cycliques dans la molécule arsénicale. Tel l'*atoxyle* ou *arsanilate sodique* $(\text{NH}^2 - \text{C}^6\text{H}^4) - \text{AsO}^3\text{Na}^2$.

Depuis les travaux de Béchamp, on connaissait un composé arsenical analogue par sa formation à l'acide sulfanilique. Ce dernier s'obtient en chauffant à sec le sulfate acide d'aniline. Par migration de la molécule SO^4H^2 , il se fait :

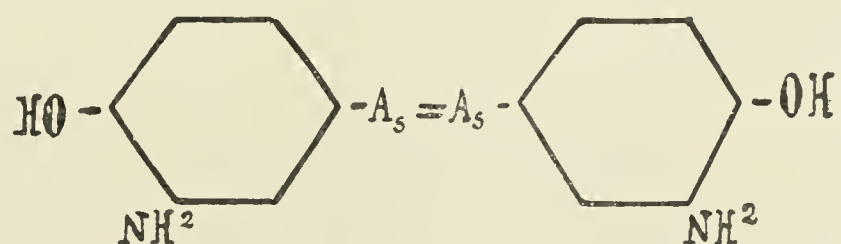


De même la calcination de l'arséniate d'aniline donne l'acide arsanilique :



Le sel monosodé de cet acide est l'*atoxyl*, soluble dans l'eau, qu'appliqua Laveran au traitement de la maladie du sommeil, après qu'il eut étudié l'action de ce sel sur les trypanosomes (parasites du sang semés par la mouche tsétsé). L'acétylatoxyl provenant de l'action du chlorure d'acétyle sur l'atoxyle, et les sels mercuriques de ces corps, ont été appliqués au traitement de la syphilis. De là un nouvel essor de l'industrie des composés arsenicaux dont on vient de voir la genèse.

Quand il fut reconnu que le noyau benzinique fixé à l'arsenic agit vivement sur les trypanosomes et sur les spirilles, on s'aperçut qu'à l'état d'arsénobenzène, $C^6H^5 - As = As - C^6H^5$, analogue au diazobenzène, il détruit ces germes. Par contre, ce médicament se fixe aussi sur l'organisme animal, c'est-à-dire qu'il est toxique. Pour le rendre plus mobile, on le solubilise à l'état de dichlorhydrate après avoir fixé sur chaque noyau un radical amidogène NH^2 et des groupes OH dans la molécule. De ces recherches il est résulté que, plus ces groupes se trouvent loin de la double liaison $As = As$, moins le corps est toxique. Le salvarsan, ou 606, étudié par l'Allemand Erlich, répond à la constitution :



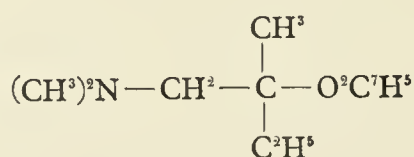
Les propriétés congestionnantes de ce médicament diarsénoïque, atténuées dans le néo-salvarsan, disparaissent dans le galyl résultant de la transformation des groupes NH^2 obtenue par M. Mouneyrat. La fabrication de ces produits, qui découlent de l'application de conceptions chimiques et physiologiques, a pris un grand développement en France dans ces dernières années.

FONCTIONS HYPNOTIQUES Parmi les recherches actuelles concernant les effets de groupes spéciaux sur le pouvoir pathologique des corps, les uréides d'acides bromés de M. Tiffeneau sont à signaler. Ces composés renferment une fonction hypnotique d'autant plus active que les produits sont plus solubles dans les lipoides, graisses protectrices des cellules vivantes. Ce résultat, conforme à la loi d'Overton, fut utilisé d'une manière ingénieuse par M. Tiffeneau. Il remplaçait les lipoides par un mélange déterminé d'huile et d'eau et mesurait le coefficient de solubilité :

Pour l' α -bromovalérylurée non hypnotique, il était	0,62
Pour l' α -bromo-isovalérylurée ou bromural hypnotique, il était ...	1,33
Pour l' α -éthyl-méthylvalérylurée TRÈS hypnotique, il était	1,90

D'autre part, la présence simultanée dans la lécithine du jaune d'œuf et dans les glycérophosphates commerciaux des deux acides α et β phosphoglycériques, a mis en lumière tous les principes actifs de ces corps si plastiques ; car, à côté du dérivé β , M. Bailly a su déceler celle du dérivé α : $\text{CH}^2\text{-OH} - \text{CH.OH} - \text{GH}^2 - \text{PO(OH)}^2$ par oxydation de sa fonction alcool secondaire qui, transformée en groupe acétonique, fut alors révélée par la réaction colorée de M. Denigès.

Enfin, l'étude raisonnée des groupes fonctionnels qui provoquent les propriétés anesthésiques de la cocaïne a démontré à M. Fourneau la possibilité de fabriquer des produits de synthèse très actifs tout en diminuant la toxicité du médicament. Ainsi le noyau pipéridique de la cocaïne, qui n'est pas dénué de toxicité, peut faire place à un noyau plus simple sans perdre sa propriété anesthésique. De là, les travaux marquants de M. Fourneau sur les amino-acides et les amino-alcools à fonction amine tertiaire, qui ont donné naissance à la *stovaine* ou éther benzoylé du diméthyl aminométhylethylcarbinol :



FULMICOTON. POUDRES DE GUERRE ET FIBRES TEXTILES

Le cycle varié des produits artificiels qui remplacent les couleurs, les parfums et les médicaments d'autrefois, aboutit par l'étude des poudres de guerre à la reconstitution des fibres employées de tout temps à la confection des tissus.

L'application directe de la chimie, après avoir fait connaître les poudres bri-

santes destinées au chargement des obus et des mines, révolutionna la fabrication des poudres lentes utilisées au chargement des armes. Pour passer de la xyloïdine de Braconnot au fulmicoton de Schœnbein, puis à la poudre sans fumée de M. Vieille, il fallut toute la science de cet ingénieur et celle de Berthelot. En effet, outre la découverte des ondes explosives qui règlent la propagation des explosions, et la détermination de la chaleur de combustion qui détermine la force des explosifs, et dont nous parlerons en thermochimie, ces savants ont dû imaginer les instruments les plus ingénieux (appareils enregistreurs, bombe calorimétrique, etc.) pour suivre les opérations indispensables à la fabrication de la poudre de guerre, dite sans fumée, actuellement en usage dans toutes les nations et qui est l'œuvre de M. Vieille. Examinons ici le côté chimique de cette question.

Le fulmicoton est un éther nitrique de la cellulose. En effet, en 1819, Braconnot a montré que le bois et les chiffons se transforment en sucre sous l'action de l'acide sulfurique ; d'autre part, les recherches de Payen ont établi que les cellules des plantes ont une même composition, qui se rattache à celle du glucose en C^6 doté de cinq fonctions alcool, dont le nombre diminue progressivement à mesure qu'on se rapproche de la cellulose par déshydratation de ce sucre. La transformation de la cellulose en éthers nitriques dans le coton devra donc être complète, ou tout au moins donner une composition constante, quand ce corps servira à la confection des poudres de guerre. Cette condition, nécessaire à l'exactitude du tir, dépend non seulement des procédés de fabrication, mais de la conservation d'un produit instable quand il n'est pas absolument neutre. A ces difficultés se joignait le réglage de sa combustion sous pression dans les armes à feu. Étudiée méthodiquement comme on l'a dit ci-dessus, la vitesse de combustion a pu être réglée par M. Vieille de telle façon que la pression initiale reste constante et en rapport avec la résistance du canon jusqu'à la sortie du projectile. Le succès de cette fabrication a été obtenu par une transformation partielle de la matière fibreuse en un colloïde moins brisant que le coton-poudre réservé aux torpilles sous-marines.

Le fulmicoton jouit de la propriété de se dissoudre dans un mélange d'alcool et d'éther. Cette dissolution porte le nom de *collodion*. Étendue sur une lame de verre, la solution dépose après évaporation des solvants une pellicule transparente et très mince qui, imprégnée de sel d'argent, a servi pendant longtemps de pellicule photographique. Sa grande inflammabilité l'a fait remplacer, surtout pour les films cinématographiques, par l'éther acétique de la cellulose, dont Schutzenberger avait indiqué la préparation.

C'est à l'aide du collodion que M. de Chardonnet réussit à produire la soie

artificielle. La soie, d'origine animale, se distingue du coton en ce qu'elle est azotée. C'est cette analogie avec la nitrocellulose qui suggéra son emploi à M. de Chardonnet. Par le filage du collodion dans l'eau, il obtenait des fils résistants et brillants mais très dangereux par leur inflammabilité. Il réussit à parer à cet inconvénient en enlevant l'oxygène nitrique par du sulfhydrate d'ammoniaque.

Il avait mis au point cette invention quand le perfectionnement de la viscose vint jeter la perturbation dans cette industrie. Les premières études faites sur la viscose remontent à Bardy, directeur du laboratoire du ministère des Finances. On l'obtient aujourd'hui très économiquement en partant de la pâte à papier et non plus du coton. La pâte de bois, bien triturée et mise au contact de sulfure de carbone mélangé d'une quantité limitée de soude caustique, donne une matière visqueuse qui, réadditionnée de soude et soumise au repos, se file comme le collodion. L'élimination de l'excès de soude se fait au moyen d'acide sulfurique étendu ; mais dans cette opération, analogue à la dénitration par le sulfhydrate d'ammoniaque, la fibre subit une désagrégation sensible, si bien que la soie de Chardonnet conserve sur elle la supériorité de la finesse des fils, sinon du prix de revient.

Une autre concurrence plus redoutable, et dont la généralisation ferait une des plus belles industries, capable même de menacer la soie naturelle, résulterait de la substitution de l'acétocellulose au collodion et à la viscose. Il suffirait que les procédés étudiés aux Usines du Rhône aboutissent à la fois au filage de cette matière et à la fabrication économique de l'acide acétique, dont la synthèse industrielle sera exposée en son temps : la fibre d'acétocellulose est en effet plus résistante que la soie des vers, mais elle est moins régulière.

COLLOÏDES Ces questions se rattachent à la connaissance des colloïdes, matières incristallisables dont la colle forte est le type. Ce sont des matières à poids moléculaires élevés après désagrégation par un liquide. Ces grosses *molécules* semblent avoir perdu la force de cohésion qui détermine la cristallisation des corps solubles ; elles sont perceptibles à l'ultra-microscope. Elles donnent par agrégation des produits flexibles et résistants dont la soie, l'écaille, le collodion, la caséine et les autres albuminoïdes sont des types variés.

L'initiateur de l'état colloïdal, l'Anglais Graham, avait observé que les gelées siliceuses minérales renfermaient au moins 200 molécules de silice SiO_2 pour une molécule de potasse ; il en concluait que ces produits gélatineux, ces gels, sont des molécules condensées. C'est la même idée que renouvelait Wyrouboff quand, dans la dialyse du chlorure ferrique, il affirmait que l'oxyde colloïdal renferme toujours

du chlore provenant de la condensation sur le sel basique $\text{Fe}^2 (\text{OH})^5 \text{Cl}$ de plusieurs molécules $\text{Fe}^2 (\text{OH})^6$ avec perte d'eau. Cette constitution explique certains effets du courant électrique sur les colloïdes, dont l'ion négatif inaperçu provient de l'acide résiduel, par une simple adaptation des idées d'Arrhénius. M. Duclaux, dans son beau livre sur les colloïdes, a donné la mesure de la valeur de ces conceptions, et établi entre les faits et leurs explications, cette harmonie qui caractérise la clarté scientifique, alors que MM. Boutaric et Wuillaume ont apporté des précisions importantes par leurs observations concernant la floculation : celle du sulfure d'arsenic colloïdal, en particulier.

Rappelons, toutefois, que certains colloïdes sont homogènes puisque Tanret a extrait de l'empois d'amidon une variété soluble, et citons une remarquable théorie de la vie fondée par M. Auguste Lumière sur l'état colloïdal.

MATIÈRES ALBUMINOÏDES OU PROTÉIQUES

Ces matières si importantes, qui constituent la cellule animale, sont toujours azotées ; elles se distinguent, en cela, des hydrates de carbone dont est formée la cellule végétale. Cependant dans les deux cas la condensation se fait par perte d'eau. En effet, par l'action de l'eau de baryte sur la chair, sur l'albumine de l'œuf ou du sang, sur la corne et la soie, Schutzenberger a dédoublé toutes ces matières par hydratation en acides aminés et en amides cristallisés, qui sont des sels ammoniacaux déshydratés. Les corps du premier genre sont le glyocolle et ses homologues supérieurs. Tous se combinent aussi bien aux bases qu'aux acides parce qu'ils renferment le radical acide CO^2H et le résidu NH^2 de l'ammoniaque. Ceux-ci, fixés sur le groupe divalent

CH^2 dans le glyocolle, lui donnent pour expression $\text{CH}^2 \begin{array}{l} \diagup \text{CO}^2\text{H} \\ \diagdown \text{NH}^2 \end{array}$. Parmi les

corps du deuxième genre, on rencontre l'amide carbonique, ou urée, $\text{CO} (\text{NH}^2)^2$, l'oxamide et une suite d'amides gras, particulièrement la leucine en C^6 et des leucéines qui sont des amides non saturés. La condensation de ces composés les uns sur les autres se fait par perte d'eau, et inversement :



En rapportant cette succession de déshydratations à une molécule d'urée, ou à un atome minéral comme celui du phosphore contenu dans les lécithines du jaune d'œuf, Schutzenberger a calculé que le nombre des atomes de carbone dépasse 260

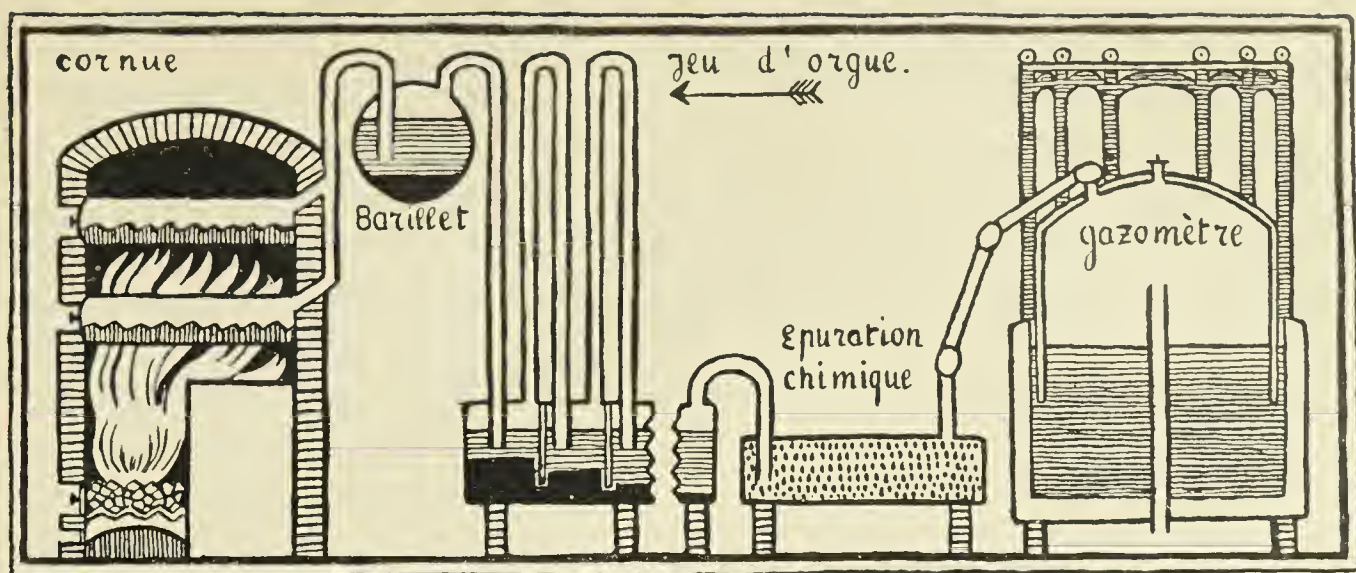
dans certaines molécules albuminoïdes. Cette proportion dénote une valeur supérieure à 4 000 pour le poids de la molécule protéique. Ces résultats ont été ratifiés par les travaux de M. Hugounenq, alors que Grimaux, par l'étude des éthylates ferriques, reliait les résultats organiques de Schutzenberger aux colloïdes de Graham.

Parmi ces matières, l'écaïlle, par sa grande valeur, reste l'objet de tentatives d'imitations et de reproductions. L'invention du celluloïd n'eut pas d'autre objet. Formé de camphre et de nitrocellulose imprégnés d'acétone et agglomérés par compression, ce mélange prend les teintes les plus variées par addition d'oxydes métalliques ou d'autres colorants ; mais il est très dangereux par suite de la présence du corps nitré qui lui communique la propriété de prendre feu au simple contact d'une étincelle. Aussi le celluloïd fait place à la caséine provenant de coagulation du lait et rendue imputrescible par addition de formol, conformément au procédé de M. Trillat.

A son tour, la caséine ayant renchéri, la viscosse imprégnée de colorants minéraux se substitue peu à peu au produit américain.

Il faut encore rapprocher de ces produits le parchemin végétal, obtenu par Aimé Girard en immergeant le papier dans l'acide sulfurique. Il sert à la dialyse, c'est-à-dire à la séparation des corps solubles cristallisables d'avec les mélasses incristallisables (procédé Dubrunfaut) et donne de la résistance à certains papiers.





CHAPITRE IV

MÉCANIQUE CHIMIQUE

I. La statique de Berthollet. — Équilibres chimiques. Équilibres homogènes et procédé Claude. — Règle des phases. — Sens des réactions et solubilité. — Dissolutions saturées et étendues. — II. Thermochimie. — Lois générales; utilisations. — III. Orientations nouvelles. — Liquéfaction des gaz. — Classification des éléments; Principe de Mendéléïeff. — Hypothèse de Prout. — IV. La chimie des hautes températures. — Moissan, le four électrique et ses applications. — L'électrolyse des corps fondus : application à la métallurgie de l'aluminium et des métaux alcalins. — L'électrolyse des corps dissous. — Ruolz. — Chlorates. — Potasse électrolytique. — V. La chimie des complexes ou composés moléculaires. — Les cobaltamines et la réaction de la chimie organique sur la chimie minérale. — Dualisme et catalyse. — Extension des résultats synthétiques.

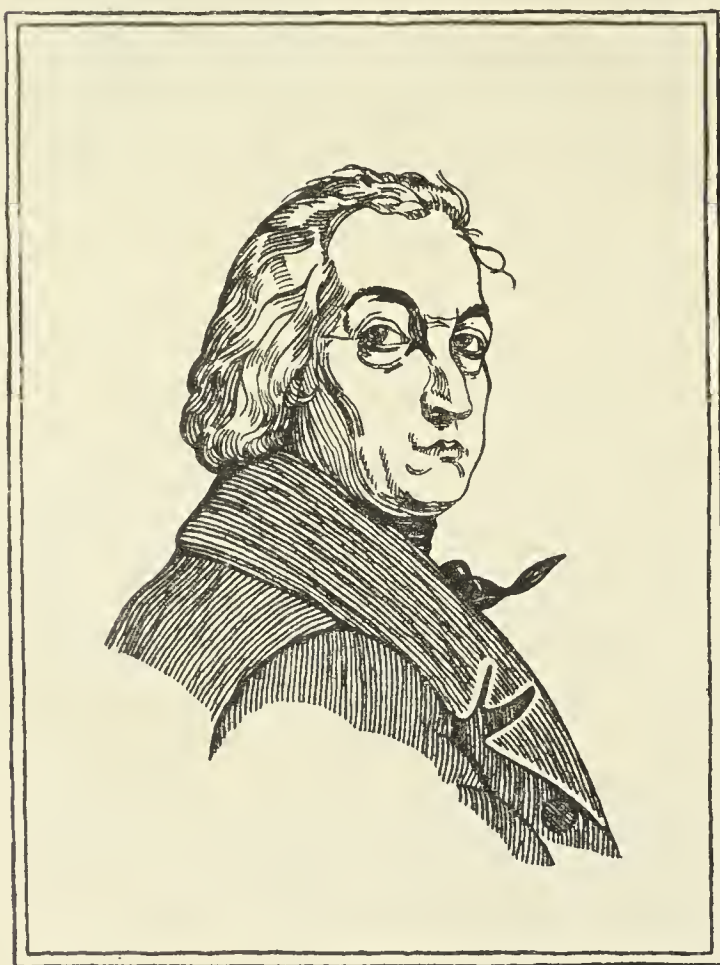
I

LA STATIQUE DE BERTHOLLET



U dix-huitième siècle, Geoffroy puis le Suédois Bergmann expliquaient l'action chimique d'un corps sur un autre par une attraction spéciale, *l'affinité*, dont ils tentèrent de mesurer la valeur. Déjà Baumé avait vu que l'affinité se renverse parfois en passant de la voie sèche à la voie humide, quand Berthollet s'attacha à prouver, dans sa *Statique chimique* (1805), que l'affinité entre deux corps est une action relative qui dépend des conditions où elle s'exerce. Remarquant ensuite que

l'attraction chimique exige le contact intime des corps, il en conclut que cette force chimique dépendait de la masse et des quantités respectives des corps en présence. Poussant cette considération à l'extrême, il en arriva à méconnaître les proportions définies, que Proust précisait et considérait justement comme essen-



BERTHOLLET (1748-1822)
(D'après une lithographie de Delpech).

tielles ; mais, à côté de cette erreur, Berthollet sut apercevoir la notion féconde d'équilibre chimique en démontrant que la masse d'un corps A en réaction sur B, change sous l'action des masses variables du corps B, et inversement. Ainsi un courant de gaz sulfhydrique décompose un carbonate dissous, et inversement le gaz carbonique en excès décompose un sulfure dissous.

Un état statique apparaît quand un corps réagissant est insoluble ou volatil ; alors s'appliquent les règles classiques connues sous le nom de lois de Berthollet. Dans une dissolution saline, ces lois régissent le déplacement de l'acide salifié par un autre acide, celui de la base salifiée par une autre base, et la double décomposition des deux sels en présence. C'est là un cas particulier très important de l'action des masses.

L'affinité chimique se manifeste encore par un dégagement de chaleur qu'il convient d'étudier.

Pour les alchimistes, la chaleur était matérielle, souvent confondue avec le phlogistique. En la considérant comme une manifestation de l'action chimique, Lavoisier put énoncer la loi de la conservation de la matière, sur laquelle repose encore la chimie ; mais il est allé plus loin : il a publié avec Laplace, en 1780, un Mémoire où il admet que la chaleur est la force vive qui résulte des mouvements invisibles des molécules des corps. D'après cette conception, la combinaison correspond à

une perte de force vive en rapport avec le dégagement de chaleur observé : c'est l'origine de l'équivalence mécanique de la chaleur. Pour introduire ce principe en chimie, il fallut encore qu'en 1824 Carnot créât la théorie mécanique de la chaleur, que Dulong découvrit les propriétés osmotiques des cellules végétales et animales, et que Gay Lussac assimilât les corps dissous aux gaz. Encore, pour s'adapter à la mécanique chimique, ces nouveautés exigèrent-elles la découverte par Sainte-Claire Deville de la dissociation (1864).

ÉQUILIBRES CHIMIQUES La projection de platine fondu dans une cuve à eau déterminait une explosion. Ce fait constaté par l'Anglais Grove restait sans explications. Deville eut l'intuition que l'eau, partiellement décomposée en ses éléments à la température de fusion du platine, formait un mélange tonnant.

Donc, comme il arrive dans les expériences de Berthollet, l'affinité de l'hydrogène pour l'oxygène varie avec les conditions de l'expérience. Ainsi un corps extrêmement stable, comme l'eau, se décompose partiellement à haute température : *il se dissocie*, puis se reconstitue par refroidissement.

Pour établir ce fait, Deville injecta de la vapeur d'eau dans un tube fortement chauffé et vit la vapeur décomposée se reconstituer progressivement dans les parties froides ; tandis qu'un refroidissement brusque, déterminé par le contact d'un tube central dans lequel on injecte de l'eau glacée, maintient la décomposition, dont les produits peuvent être recueillis. Ce dispositif du tube chaud et froid a été appliqué à divers composés. En joignant à cette expérience l'étude de la température des zones de combustion d'un mélange d'oxyde de carbone et d'oxygène, Deville conclut que la combinaison chimique est assimilable à la condensation des vapeurs.

Ce rapprochement fait de Deville le continuateur de Berthollet, de Lavoisier et de Laplace. Ses élèves, Debray, Isambert, Troost, Hautefeuille, ont trouvé des exemples comparables au cas des vapeurs saturées en étudiant les systèmes hétérogènes. En vase clos, la dissociation du carbonate de chaux est caractérisée par une tension rigoureusement déterminée à une température donnée, quelle que soit la masse du corps solide chauffé, de même que la tension de la vapeur d'eau à une température donnée est indépendante de la masse du liquide.

Ces expériences, résumées dans les *Leçons sur la dissociation*, faisaient rentrer les phénomènes chimiques sous les lois de la physique, pourvu que l'on opérât dans des conditions convenables de température. Il restait à rattacher les phénomènes *physico-chimiques* à la mécanique.

Auparavant, l'ingénieur Clapeyron avait tiré de la thermodynamique son équation célèbre qui règle l'émission des vapeurs saturées. En 1871, Moutier, puis Peslin, en indiquant comment cette égalité s'adapte aux systèmes chimiques hétérogènes, ont par là même guidé les chimistes dans la voie de la mécanique *rationnelle*. L'égalité de Clapeyron $425 \times L = T (V-v) \times \frac{dp}{dT}$ appliquée à la formation des vapeurs saturées pour lesquelles le volume final V est supérieur au volume v initial, exprime que la pression p de la vapeur augmente avec la température T , parce que la chaleur de volatilisation L est toujours positive. Mais dans le cas des décompositions hétérogènes, les conditions nécessaires de Clapeyron ne suffisent plus.

Il arrive en chimie qu'une expansion gazeuse $p > 0$ corresponde à une chaleur négative de décomposition $L < 0$; alors l'équilibre est impossible. Ce sont ces conditions qu'en 1897 M. Colson substitua aux diverses causes invoquées pour expliquer les actions dont les lois de Berthollet sont un cas particulier. Ce n'est point parce que le gaz HCl est volatil qu'il est déplacé par SO^4H^2 dans les sulfates anhydres tels que SO^4Pb ou SO^4Cu ; car l'action inverse est réalisable et donne lieu à un équilibre comparable à celui d'une vapeur saturée, parce que L et $\frac{dp}{dT}$ sont de même signe. Au contraire, ces deux quantités étant généralement de signe contraire quand on remplace le gaz HCl sec par H^2S , tout équilibre devient alors rationnellement impossible.



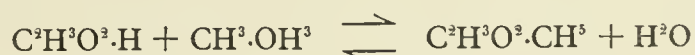
SAINTE-CLAIRE DEVILLE (1818-1881)

Tout autre est la difficulté de reconstituer les carbonates d'argent et de plomb dissociés. L'attribuer à des frottements ou à la viscosité, c'est désigner par des mots l'impuissance expérimentale et non l'expliquer. M. Colson a montré que, si la dissociation de ces sels n'est pas parallèle à celle du carbonate de chaux, comme elle devrait l'être, c'est que la valeur de L est faussée par suite d'une polymérisation des oxydes dissociés, altération antérieurement étudiée par Henry, de Louvain, et que les récentes recherches de M. Villiers (1916) ont considérablement étendue. Pour faire cesser l'altération de ces oxydes, un catalyseur indiqué est l'eau qui empêche ou

détruit la polymérisation de l'oxyde. De fait, en maintenant constante par une paroi froide la tension de la vapeur d'eau, on retrouve les tensions observées pendant la décomposition et on explique l'irréversibilité de certaines actions.

ÉQUILIBRES HOMOGÈNES Si les équilibres hétérogènes sont régis par une tension gazeuse dépendant uniquement de la température et non de la masse du corps en dissociation, il n'en est plus ainsi des actions homogènes. Définies par l'état gazeux de tous les constituants ou par leur dissolution dans un même liquide, ces actions dépendent au contraire de la pression gazeuse, comme dans le cas de l'acide iodhydrique ou de la concentration des sels en solution. Les lois des équilibres homogènes diffèrent donc de celles des équilibres hétérogènes par l'effet des masses.

L'étude méthodique de l'éthérification des alcools par les acides, entreprise vers 1861 par Berthelot et Péan de Saint-Gilles, est doublement mémorable. Ces deux savants ont montré que ce phénomène est limité par la réaction inverse, et ils ont mis en lumière l'importante notion de vitesse dans les réactions chimiques. Par exemple, une molécule d'acide acétique réagissant sur une molécule d'un alcool primaire quelconque, fournit un éther correspondant et de l'eau, et inversement :



de sorte que la proportion d'alcool éthérifié étant de 66 pour 100 dans les conditions indiquées, la saponification d'une molécule d'éther par une molécule d'eau se fixe constamment à 34 pour 100, quels que soient l'acide et l'alcool employés, mais elle change avec la proportion de ces corps. Si de plus la proportion d'alcool éthérifié se fixe à 66 pour 100 indépendamment de la température, le temps nécessaire pour atteindre cet équilibre est au contraire influencé par l'action de la température. Excessivement lente à froid, la réaction s'accélère quand on chauffe, et vers 150 degrés, la limite de 66 pour 100 est atteinte en quelques heures sans pouvoir être dépassée par une prolongation de chauffage. Il en est de même de la limite relative à la réaction inverse, et Berthelot a admis que l'équilibre résulte de l'égalité de la vitesse de l'action et de celle de la réaction, qui s'oppose à l'action et la limite.

Cette notion de vitesse dans les phénomènes chimiques et celle d'action des masses, indiquée en 1805 par Berthollet, sont la base des formules mathématiques attribuées aux équilibres chimiques par des savants suédois et par M. Lemoine. Les

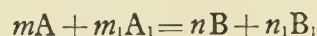
idées de ces savants, partis sans le savoir de considérations semblables, évoluèrent différemment pour aboutir à des conclusions analogues. En 1867, quand Hautefeuille constatait la dissociation du gaz iodhydrique, Guldberg et Waage tentaient de traduire par une équation les phénomènes d'éthérification ; mais, perdant de vue les réactions principales pour s'attacher à des réactions secondaires, compliquées et hypothétiques, ils arrivèrent à une expression plus empirique que rationnelle, qu'ils abandonnèrent en 1879. M. Lemoine de son côté se bornait, dès 1874, à l'étude de cas simples de dissociation ou d'équilibre unimoléculaire, et il publiait en 1877, aux *Annales de chimie et de physique*, une formule applicable à l'éthérification, à la dissociation du gaz iodhydrique et à l'équilibre observé par Friedel dans la combinaison du gaz chlorhydrique avec l'oxyde de méthyle. Ayant vérifié l'identité d'équilibre des systèmes $H^2 + I^2$ et $2 HI$ que ne trouble aucune action secondaire, M. Lemoine conclut de ses expériences que l'équilibre isotherme homogène dépend de la pression, c'est-à-dire de la masse du composé et de celle des constituants. Puis, préoccupé de l'importance pratique de l'obtention rapide du produit cherché, il s'attacha aux déterminations expérimentales des vitesses de réaction et précisa l'effet des corps poreux. Il établit en 1874 que leur présence accélère les actions exothermiques à la manière des accroissements de pression sans toutefois changer la limite d'équilibre. A son avis, souvent développé, les corps poreux condensent les molécules gazeuses à leur surface et facilitent leur rencontre en les rapprochant. Cette idée, à l'étranger, porte le nom d'*adsorption*.

L'ensemble de cette œuvre personnelle fait de M. Georges Lemoine un initiateur des méthodes nouvelles et le vrai continuateur des maîtres français de la mécanique chimique. Son Mémoire de 1877 relate l'importance de la notion de vitesse de réactions, et montre avec quelle facilité celle-ci s'introduit dans l'expression mathématique des équilibres homogènes quand on la lie à la notion de masse.

Or, jusqu'en 1879, Guldberg et Waage n'avaient pas appliqué leur méthode aux phénomènes de dissociation ; ils omettaient de considérer au même titre la vitesse de combinaison et celle de décomposition, identiques dans le cas d'équilibre. Après avoir plusieurs fois modifié profondément leur théorie, qu'ils voulaient générale, ils arrivèrent (1879) à établir une formule qui s'applique à tous les équilibres homogènes et qu'ils étendirent aux équilibres hétérogènes, notamment aux résultats de Dulong concernant la *décomposition des sels insolubles par des dissolutions de carbonate alcalin*. En voici l'énoncé :

Quand m molécules d'un corps A s'unissent à m_1 molécules d'un corps A, pour

donner naissance à n molécules d'un composé B et à n_1 molécules d'un autre composé B_1 , autrement dit, quand l'équation chimique est :



l'équilibre à température constante T a pour expression mathématique :

$$\frac{p^m \times p_1^{m_1}}{q^n \times q_1^{n_1}} = \text{Constante.}$$

dans laquelle p et p_1 sont les pressions partielles des corps A et A_1 ; et q et q_1 celles des composés B et B_1 dans le mélange en équilibre isotherme à T^0 .

Rattachée plus tard à la *thermodynamique* par Van't Hoff, cette formule, admise partout, règle les effets de la pression sur les équilibres homogènes et en donne une estimation. Appliquons-la, par exemple, à la célèbre synthèse de l'ammoniaque : La formule chimique : $N^2 + 3 H^2 \rightleftharpoons 2 NH^3$, indique que, dans un volume déterminé, la pression de l'azote et celle de l'hydrogène nécessaires à la production de l'ammoniaque sont dans le rapport de 1 à 3. De sorte que si p est la pression partielle de l'azote, celle de l'hydrogène p_1 sera exactement 3 p . Dans le récipient où les deux gaz sont mélangés dans cette proportion, ajoutons l'ammoniaque sous une pression q telle que le mélange des trois gaz réponde aux proportions d'un équilibre homogène à T ; la condition nécessaire à cet équilibre sera, d'après la loi de Guldberg et Waage :

$$\frac{p \times (3p)^3}{q^2} \quad \text{ou} \quad \frac{p^4}{q^2} = \text{Constante.}$$

Elle montre que pour augmenter la masse de l'ammoniaque, c'est-à-dire sa pression q dans le récipient, il faut que la pression p s'élève aussi, afin de rétablir la valeur de la constante, ou inversement. Par conséquent, soit par compression directe, soit par introduction d'une nouvelle quantité des constituants dans le récipient, la pression totale $P = q + p + 3p$ augmentera elle-même, puisque chacune de ses parties constituantes s'accroît. Si, à la température fixe T, on arrive à la pression fixe q' qui détermine la liquéfaction de l'ammoniaque, la formule d'équilibre montre que la pression corrélatrice p' propre aux constituants sera elle-même fixe. Si, en cours de fabrication, la pression $4p$ exercée sur le mélange $H^3 + N$ dépasse momentanément $4p'$, la vitesse de reconstitution s'accélérera et multipliera celle du catalyseur jusqu'à ce qu'elle revienne à la valeur d'équilibre $4p$,

conformément aux enseignements de M. Lemoine. Tel est précisément le résultat obtenu par M. Claude : il marque un côté parfaitement original de son procédé.

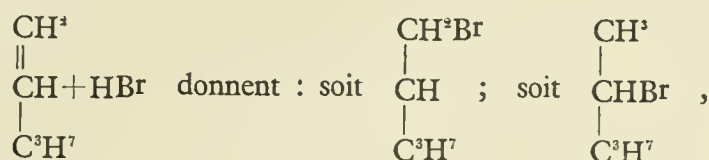
A propos de sa formule, M. Lemoine mentionne qu'avant l'année 1879 Moutier avait établi d'après la thermodynamique que le rapport du volume de gaz iodhydrique au volume des gaz dissociés est nécessairement indépendant de la pression à une température fixe. Autrement dit, la quantité d'acide iodhydrique non dissocié est proportionnelle à la pression des constituants, par suite à la pression totale. Ajoutons que des savants étrangers, Horstmann et Gibbs, en partant de la notion d'entropie, avaient examiné le cas des équilibres avec changement de volume, et que l'Américain Gibbs, dans ses recherches faites, de 1875 à 1878, sur *l'équilibre des substances homogènes*, apportait à l'appui de sa formule rationnelle des expériences concernant le peroxyde d'azote, l'acide acétique et le perchlorure de phosphore.

Toutefois, l'entropie est, aujourd'hui encore, une quantité mathématique peu familière aux chimistes, et les expériences nécessaires à son expression sont parfois plus difficiles à réaliser que le phénomène soumis à l'étude. Il ne faut donc point s'étonner que les chimistes n'aient pas prêté à ces considérations de haute physique autant d'importance qu'aux théories moins abstraites ou expérimentales de M. Lemoine, de Guldberg et Waage.

Les résultats fournis par l'étude des équilibres homogènes ont réduit les différentes objections encore opposées à la théorie atomique. Ainsi tombait l'argument que Deville tirait des anomalies des vapeurs de PCl_5 , de NH_4Cl et de l'hydrate de chloral : du fait que ces vapeurs occupent quatre volumes, leur poids moléculaire (ou leur molécule) était selon lui dédoublé, ce qui exigeait la subdivision des atomes Cl, N et P. Wurtz, au contraire, expliquait ce prétendu dédoublement par une simple dissociation (par exemple : $\text{PCl}_5 = \text{PCl}_3 + \text{Cl}_2$), et ses expériences, montrant que l'excès de l'un des composants diminue la dissociation, vinrent confirmer ses vues. En même temps Marignac prouvait que, contrairement à certaines affirmations de Deville, la combinaison de NH_3 avec HCl dégage la même quantité de chaleur que la volatilisation du chlorhydrate d'ammoniaque formé.

La formule des équilibres homogènes n'a aucun pouvoir suggestif. Pour l'appliquer, il faut être certain que seuls les corps figurant dans la formule chimique d'équilibre existent dans le mélange ; de sorte que cette loi, qui règle les phénomènes, reste incapable de les prévoir. Par exemple, la dissociation du bromhydrate d'amylène, étudiée par Wurtz et par M. Lemoine et si souvent invoquée, n'obéit pas à la formule de Guldberg, car à 180 degrés, d'après les expériences de M. Lemoine, dont nous avons vérifié l'exactitude, la constante K varie de 1 à 3 quand la pression du

système passe d'une atmosphère à 0,1 atm. Cette anomalie embarrassante, longtemps passée sous silence, tient à ce que, si le bromhydrate d'amylène bouillant à 107 degrés, exclusivement utilisé, régénère l'acide bromhydrique et l'amylène constitutifs, en revanche ces deux corps laissés en contact donnent naissance à deux bromhydrates isomériques :



de sorte que l'équilibre se fait entre quatre corps et non pas entre trois.

Ces remarques s'appliquent mieux encore aux corps dissous, car non seulement les oxydes de plomb et d'argent à l'état naissant, altérés par le temps et la chaleur, ne rentrent plus en réaction avec le gaz carbonique, mais nous avons dit encore que les corps dissous, si souvent altérés par la chaleur, affectent, d'après le mémoire publié en 1916 par M. Villiers, un *état protomorphique* au moment de leur précipitation. Si, comme il arrive au carbonate de plomb, la rentrée en combinaison nécessite le retour plus ou moins complet à cet état protomorphique, la formule chimique ne précise pas cette condition, et l'expression mathématique de l'équilibre, basée sur cette formule, ne répond plus à la réaction réelle. Telle est aussi, ce semble, l'explication des expériences remarquables de M. Boutaric sur la vitesse de décomposition du permanganate de potassium par l'acide oxalique. Observés au spectro-photomètre, les résultats ne vérifient pas la loi exponentielle de Wilhelmy sur l'interversion du sucre de canne par les acides observée au polarimètre de Biot. C'est que la réduction du permanganate n'aboutit à $\text{SO}^4\text{Mn} + \text{CO}^2$ qu'en passant par des composés intermédiaires qui agissent sur l'acide oxalique avec le permanganate, tout en modifiant sans cesse la concentration de celui-ci, alors que l'hydrolyse du sucre de canne résulte uniquement d'une fixation d'eau sur le sucre par l'intermédiaire du solvant dont la masse est peu changée.

RÈGLE DES PHASES La même réserve s'applique à la loi des phases de l'Américain Gibbs, qui, elle aussi, institue un contrôle de l'équilibre. La variance est le nombre N des conditions qui restent à fixer pour qu'un système en équilibre se consolide invariablement, c'est-à-dire pour que toutes les variables soient fixées. Ce nombre dépend de celui des variables indépendantes C

et de celui φ des phases qui régissent l'équilibre : $N = C + 2 - \varphi$. Les phases sont les états physiques homogènes : gazeux, solide, liquide pur ou chargé de sels dissous, intervenant dans la réaction.

La difficulté d'application consiste dans l'évaluation du nombre C . Il est égal à celui des corps définis qui sont en présence, diminué des relations chimiques qui les rattachent. Si ces espèces affectent un état protomorphique, leur mélange avec les corps normaux change le nombre des phases, jusqu'à ce que l'état normal se rétablisse. Ce retour nécessaire à l'état normal explique, ce semble, pourquoi l'équilibre à température constante n'apparaît souvent qu'au bout d'un temps très long, surtout à basse température. Mais si les composés protomorphiques sont susceptibles de réagir et de donner des espèces imprévues, la loi des phases est, sinon en défaut, du moins incompatible avec l'équilibre exprimé en vertu de formules chimiques admises par analogies ou pour des raisons de simplicité. Outre le cas du bromhydrate d'amylène, la réaction $\text{Cu SO}^4 + 2 \text{ KOH} = \text{Cu (OH)}^2 + \text{SO}^4 \text{ K}^2$, formulée sans réserves à l'appui des lois de Berthollet, ne s'effectue, comme beaucoup d'autres semblables, que si on verse lentement la dissolution saline dans la solution équivalente d'alcali, mais non si l'on verse la potasse dans le sel dissous. Aussi la possibilité d'actions directes entre corps protomorphiques pourrait servir de fondement à une nouvelle chimie inaperçue.

SENS DES RÉACTIONS ET SOLUBILITÉ

De l'application que Moutier avait faite de la formule de Clapeyron aux réactions chimiques, on devait conclure que les composés exothermiques, c'est-à-dire ceux dont la formation dégage de la chaleur, sont seuls susceptibles d'être dissociés à haute température ; mais que l'on pouvait, à des températures très élevées, déterminer la formation des corps endothermiques destructibles spontanément à des températures beaucoup plus basses. Il citait l'exemple inverse de l'acétylène qui, formé avec une très forte absorption de chaleur, prend naissance aux hautes températures et se détruit par refroidissement. Une note qu'il publia au *Bulletin de la Société philomathique* en 1877, est « capitale pour l'histoire de la mécanique chimique », dit Duhem, son élève. Elle avait trait au sens d'une action quelconque sous l'influence d'une élévation de température.

Ne perdant pas de vue que les actions irréversibles sont les plus nombreuses, au point qu'elles furent longtemps considérées comme distinctives des phénomènes chimiques, Moutier conclut de leur analyse que les transformations sous pression constante sont déterminées par le signe de la chaleur mise en jeu dans la

réaction. Deux ans plus tard, Robin énonçait une loi semblable concernant le rôle de la pression à température constante. Ces applications de la thermodynamique à la chimie ont incité Duhem à utiliser les inégalités qui expriment la stabilité de l'équilibre et fixent le sens des déplacements. « Il y a rattaché, sous une forme très générale, les fameuses lois du déplacement de l'équilibre, entrevues par Gibbs et portant les noms de M. Le Chatelier et de Van't Hoff », écrit M. Emile Picard dans sa belle biographie de Duhem. Van't Hoff énonça en 1884 la loi du déplacement de l'équilibre par la variation de la température ; puis M. Le Chatelier, celle qui résulte de la variation de la pression. C'est l'ensemble de ces deux cas que ce savant a groupé comme il suit, sous le nom de loi de l'opposition de la réaction à l'action :

L'équilibre se déplace de telle façon que la modification d'une des conditions qui influent sur l'état d'équilibre provoque une réaction qui tendrait à faire varier en sens contraire la condition modifiée.

Considérant cette loi comme purement expérimentale, il l'a principalement appuyée sur les phénomènes de dissolution.

DISSOLUTIONS La nécessité de connaître les lois de la solubilité s'affirmait de plus en plus. Depuis l'établissement par Gay-Lussac de courbes de solubilité, les études de Lœwel, élève de Chevreul, sur les sulfates de soude, avaient été suivies de la découverte, par Raoult, des lois qui portent son nom ; et Van't Hoff, rattachant ces faits à la thermodynamique, avait donné aux lois de la dissolution un caractère rationnel.

SOLUTIONS **ÉTENDUES** En premier lieu, dans le cas des dissolutions étendues où le corps dissous n'est pas altéré par le solvant, les propriétés du liquide dissolvant varient d'une manière uniforme, comme le prouve l'expérience. Ainsi son point de congélation s'abaisse proportionnellement à la concentration du corps dissous, ainsi que sa température d'ébullition et sa tension maxima de vapeur. Il y a plus : les abaissements moléculaires sont, pour un solvant donné, indépendants de la nature de la molécule dissoute dans un kilogramme de solvant, c'est-à-dire qu'une molécule d'un corps quelconque abaisse identiquement le point de congélation d'un kilogramme d'un solvant donné. Cette loi, due au physicien français Raoult, est la base de la cryoscopie ; elle rend les plus grands services aux chimistes pour la détermination du poids moléculaire des corps qui ne sont pas volatilisables. Il en est de même des lois tonométriques, également établies par Raoult et relatives aux abaissements constants de la tension d'une vapeur saturée et du point

d'ébullition d'une masse fixe de solvant tenant en dissolution une molécule quelconque. Il est curieux que les résultats cryoscopiques ou tonométriques ne soient pas altérés quand le corps dissous est susceptible de se combiner aux solvants.

Conformément à une hypothèse antérieurement émise par Gay-Lussac, et employée dès 1860 par Rosensthiel, directeur de l'École de chimie industrielle de Mulhouse et plus tard professeur au Conservatoire des Arts et Métiers, Van't Hoff assimila les corps dissous aux gaz. De même qu'un gaz introduit dans un volume V connu, exerce une pression déterminée p , à une température fixe T ; de même un solide introduit dans un volume U de solvant possède à température fixe T une force d'expansion mesurée par une pression osmotique p en tous points comparable à une pression gazeuse, d'après les expériences de Devriès et de Van't Hoff. Dès lors, dans un équilibre homogène entre corps dissous, la loi de Guldberg et Waage conserve sa forme habituelle, à condition que p et q figurent les pressions osmotiques des constituants au lieu d'en représenter les pressions gazeuses.

Dans les dissolutions saturées, quand le corps dissous est susceptible de fournir des hydrates, l'eau d'hydratation intervient et prend un véritable caractère spécifique. En effet, Lœwel, en étudiant les dissolutions saturées des diverses variétés de sulfate sodique, le sel anhydre $\text{SO}^4 \text{Na}^2$, le sel de Glauber $\text{SO}^4 \text{Na}^2, 10 \text{H}^2 \text{O}$, l'heptahydrate $\text{SO}^4 \text{Na}^2, 7 \text{H}^2 \text{O}$, a démontré que chacune de ces variétés possède une courbe de dissolution propre; ainsi pour l'un et l'autre sel hydraté, la courbe croît rapidement quand la température croît, tandis que celle du sel anhydre décroît, et coupe les deux autres à $t = 33^\circ$ pour le sel de Glauber, et à $t = 26^\circ$ pour l'autre hydrate. Bref, chaque variété de sulfate se comporte comme une espèce saline distincte.

Tout le monde proclame l'importance fondamentale de ces expériences de Lœwel; mais on l'oublie dans les théories en cours basées sur l'assimilation d'une dissolution saturée à une vapeur saturée, et traduites par l'expression déformée $425 \times Q = T \times U \times \frac{dp}{dT}$ de l'égalité de Clapeyron, dans laquelle Q ne représente plus la chaleur de saturation analogue à la chaleur latente ni U le volume du solvant. Pour revenir à cette assimilation et pour exprimer à la fois les propriétés des solutions saturées et les constatations de Lœwel, M. Colson, adoptant une marche semblable à celle qu'appliqua Peslin à la dissociation du carbonate de chaux, retrouva la relation de Clapeyron : $425 \times L = T (U-v) \frac{dp}{dT}$, dans laquelle L représente la chaleur de saturation rapportée à une molécule dissoute et non plus, comme dans la première formule, « la quantité de chaleur dégagée par une molé-

cule du corps se dissolvant dans un volume suffisant de sa solution presque saturée. » Si ces deux quantités, dont la dernière est mal définie, sont souvent assimilées, le cas du sel marin, vers 0°, prouve que l'assimilation de $\frac{dC}{dT}$ avec $\frac{dP}{dT}$ n'est pas possible, attendu qu'elle conduit à un absurde maximum de solubilité de NaCl vers 2°. D'ailleurs on a $p = CT$ en négligeant l'ionisation peu variable aux environs d'un maximum de concentration C. Donc théoriquement : $\frac{dp}{dT} = C + \frac{dC}{dT}$;

c'est-à-dire que la pression osmotique continue à croître au maximum de concentration, contrairement à l'opinion que p augmente avec C (VAN'T HOFF, *Chim. phys.*, t. I, p. 34). Dans le cas des solutions très concentrées (sel de Gauber), la dissolution est un phénomène compliqué. En effet, ajoutons et retranchons simultanément le volume V du solvant à U — v dans la formule en L ; il est évident que : $U - V - v = U - (V + v)$ est la contraction du système passant du volume initial V + v au volume final U dans lequel s'exerce la pression osmotique p .

Figurons par ϵ cette contraction ; la formule $425 L = T(V + \epsilon) \frac{dp}{dT}$ exprime le phénomène de saturation dans les dissolutions avec toutes ses particularités, y compris les réserves de Lœwel : la quantité V toujours positive caractérise la nature du sel anhydre ou hydraté, si bien que, V devenant très petit, la solubilité prend l'allure d'une fusion (cas du corps fondu dans son eau de cristallisation).

Soit le cas d'une solution de glace dans l'alcool vers zéro degré : le refroidissement des solutions étendues provoque une congélation de l'eau, et cette séparation de glace solide, réversible avec la température, est assimilable à un phénomène de solubilité dans lequel la chaleur de saturation se confond avec la chaleur de fusion de la glace. Pour les solutions dans peu d'alcool, le volume V de ce solvant reste positif, mais la contraction corrélative ϵ étant négative et supérieure à V, le facteur $V + \epsilon$ est négatif. Contrairement au fondement de la théorie en cours, ici L, qui mesure ces deux actions superposées, change de signe sans répondre à un maximum de concentration.

En rapportant les phénomènes au pourcentage du sel dissous, on retrouve non seulement la théorie de Van't Hoff sur les solutions étendues, c'est-à-dire le rattachement de la cryoscopie à la thermodynamique, mais en outre une théorie et l'explication de l'eutexie.

II

THERMOCHEMIE

L OIS GÉNÉRALES Dans ce qui précède apparaît la nécessité de connaître la valeur des quantités de chaleur mises en œuvre dans les divers phénomènes. Depuis longtemps, le Mémoire de Lavoisier et Laplace en avait marqué l'importance en chimie et provoqué les recherches de Dulong et Petit sur les chaleurs spécifiques, puis celles de Regnault et, à l'étranger, celles de Wœstine. Dès lors, la mesure des quantités de chaleur produites par les modifications physico-chimiques apparut comme une source de données indispensables. Ces déterminations font l'objet de la *thermochimie*, dont les promoteurs ont été Dulong, Favre, Silbermann, Berthelot et ses élèves en France, Hess, Louguinine et Zaboudski en Russie, Thomsen en Danemark.

Le calorimètre en peau de cygne de Dulong, le calorimètre à glace de Favre et Silbermann, ont fait place aux instruments plus simples de Berthelot. L'emploi du thermomètre gradué au centième de degré, notamment, a permis de s'en tenir à de faibles écarts de température, facilitant la rapidité des opérations et diminuant l'influence des erreurs de rayonnement, si difficiles à corriger.

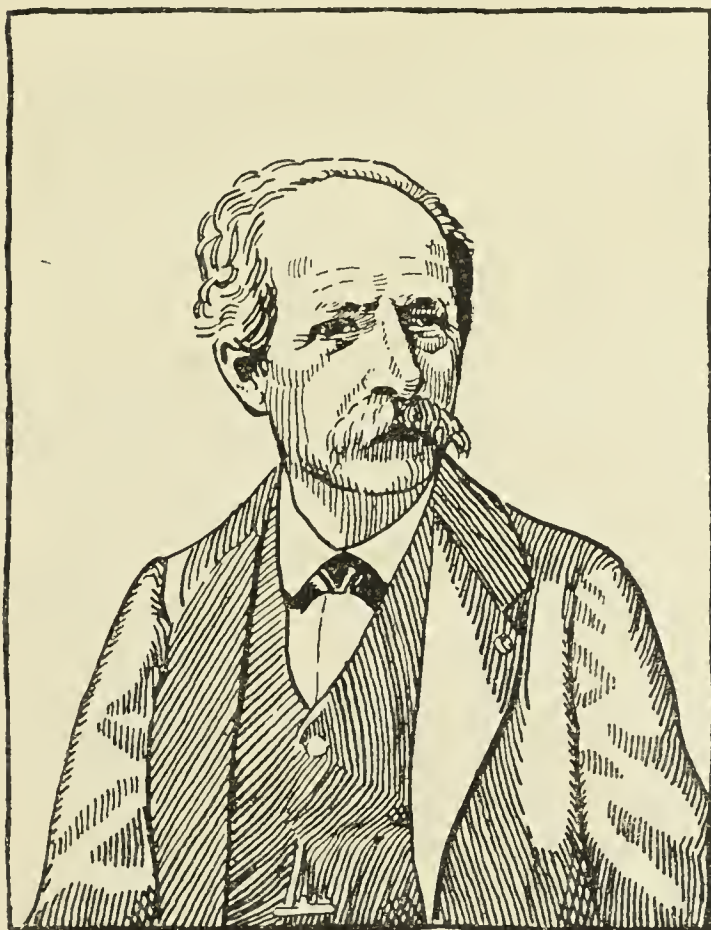
D'autre part, la bombe calorimétrique, imaginée par Berthelot et Vieille, a permis, par la combustion presque instantanée des matières organiques dans l'oxygène comprimé, la mesure de toute combustion. Elle fut d'abord utilisée pour l'étude des explosifs et des poudres. Modifiée par M. Malher, ingénieur des mines, qui a remplacé par de l'acier émaillé le platine de l'appareil primitif, la bombe calorimétrique est aujourd'hui employée dans toutes les usines pour estimer rigoureusement la valeur calorifique des combustibles industriels.

Considérant les mesures calorimétriques comme l'expression du travail moléculaire mis en œuvre dans les réactions, Berthelot énonça la loi de l'état initial et final, et le principe du travail maximum.

1^o *Loi de l'état initial et de l'état final.* — Elle s'énonce : La chaleur dégagée par un système qui se transforme, à volume constant ou à pression constante,

dépend uniquement de l'état initial et de l'état final ; elle est la même, quelles que soient la nature et la suite des états intermédiaires.

Berthelot et les thermochimistes s'en servent pour déterminer la chaleur de formation des composés organiques, qui est *égale à l'excès de la chaleur de combustion des éléments sur la chaleur de combustion du composé* (SARRAU : *Introduction à la théorie des explosifs*, 1893), réactions qui, ni l'une ni l'autre, ne sont réversibles.



BERTHELOT (1827-1907)

La même règle s'applique à l'estimation des chaleurs de saturation, dont on a vu toute l'importance à propos de la solubilité.

Les tables thermochimiques font connaître la chaleur dégagée par les principales combinaisons sous la pression atmosphérique 0,76, les composants et les composés étant pris à la température ordinaire, vers 15 degrés ; les nombres correspondent à la formation d'une molécule exprimée en grammes, les quantités de chaleur en calories.

2° Principe du travail maximum.—

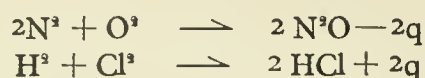
Tout changement chimique accompli sans intervention d'une énergie étrangère, à température constante, tend vers la production du corps ou du

système de corps qui dégage le plus de chaleur.

L'application de cet énoncé conduit fréquemment à des résultats satisfaisants. Berthelot les a surtout mis en lumière dans son *Essai de mécanique chimique* et dans son beau livre *Sur la force des matières explosives d'après la thermochimie*.

Ce principe a pour corollaire l'instabilité provoquée par la pression sur les corps dont la décomposition dégage de la chaleur. L'expérience classique du général Sébert concernant la décomposition instantanée, sous l'effet d'une brusque compression, du protoxyde d'azote formé avec absorption de chaleur, fut une confirmation sensationnelle de ce corollaire.

La loi de Lavoisier se complète alors par l'intervention de la chaleur moléculaire de formation :



la flèche indiquant le sens de l'action chimique.

UTILISATIONS Les recherches de Berthelot, Sarrau et Vieille et l'application de cette règle pratique font connaître avec assez d'exactitude les effets d'un explosif pour qu'on puisse calculer à l'avance la vitesse communiquée à un projectile par une poudre de composition donnée. Les progrès survenus dans la fabrication des poudres sont dus à cette suite de travaux à laquelle Berthelot et Vieille ont ajouté la découverte de l'*onde explosive*.

Ce mode de mouvement particulier aux explosions a surtout été étudié dans le cas des mélanges gazeux ; mais, qu'il s'agisse de gaz ou de solide, la propagation de l'onde est la même ; d'après Berthelot et Vieille, elle provient de chocs successifs. Celui de l'amorce sur la tranche voisine en provoque la décomposition, d'où un nouveau choc sur la tranche suivante qui, brusquement décomposée, réagit à son tour sur une troisième tranche, et ainsi de suite de proche en proche. Ces chocs répétés, en rapport avec la température développée dans la décomposition, se propagent dans toute la masse, déterminant un mouvement ondulatoire semblable à celui que produit un corps sonore. Il en diffère en ce que le son se propage avec une force vive très faible, un excès de pression très petit, et une vitesse déterminée par la constitution chimique invariable du milieu vibratoire qui le transmet ; au contraire, la brusque réaction chimique communique au milieu vibratoire qui en résulte une force vive, un excès de pression et une vitesse énormes. Ainsi la vitesse du son dans un mélange oxhydrique ($\text{H}^3 + \text{O}$) est d'environ 510 mètres, tandis que celle de l'onde explosive résultant de la formation de l'eau atteint 2 840 mètres.

Ces théories ont eu une influence considérable sur la fabrication des explosifs, sur leur mode d'emploi et, nous l'avons dit, sur la découverte de la poudre sans fumée par M. Vieille. Elles ont contribué dans une large mesure à la prépondérance de notre artillerie et par suite au succès de notre résistance à l'agression allemande.

Toutefois, la stabilité d'un composé n'est pas déterminée par la quantité de chaleur dégagée dans sa formation ; la température peut renverser l'action chimique, comme nous le verrons. En d'autres termes, le principe du travail maximum ne donne qu'une approximation des phénomènes. En prétendant que ce principe n'est

rigoureux qu'aux environs du zéro absolu, Nernst sort des réalités qui importent aux observateurs ; d'ailleurs, Raoul Pictet, de Genève, avait déjà montré que bien au-dessus du zéro absolu l'affinité des corps disparaît au point que l'acide sulfurique n'agit plus sur les bases.

Il est juste de dire que Fabre et Silbermann avaient constaté depuis longtemps que la combustion de l'acide formique produit plus de chaleur que celle de l'oxyde de carbone ; autrement dit, que la synthèse de l'acide formique par l'union de l'oxyde de carbone avec l'eau se fait avec absorption de chaleur, ou qu'inversement sa décomposition en eau et en oxyde de carbone dégage de la chaleur. Ce fait et d'autres semblables découverts par ces modestes savants, ne furent pas sans influence sur la thermochimie. Ils démontraient que le principe du travail maximum ne règle pas absolument le mécanisme des actions chimiques en mettant uniquement en jeu les quantités de chaleur : il ne traduit que le principe de l'équivalence mécanique de la chaleur et laisse de côté le principe de Carnot relatif au rôle de la température, c'est-à-dire de la qualité de la chaleur. On vient de voir, d'un autre côté, sous quelles formes l'ensemble de ces conditions indispensables, exprimées par l'équation de Clapeyron, a pénétré en chimie.

Rappelons enfin que les théories de Berthelot résolvent avec une approximation suffisante les problèmes où interviennent les actions vives, et qu'elles ont éclairé une question capitale de physiologie, car de simples expériences thermochimiques ont prouvé qu'en dehors de la combustion résultant des phénomènes respiratoires, une notable proportion de la chaleur animale provient de fermentations et d'hydratations diastasiques.

III

ORIENTATIONS DIVERSES

L IQUÉFACTION DES GAZ ET CLASSIFICATION DES ÉLÉMENTS

Avant de pénétrer plus avant dans ces applications, revenons aux classifications. Les éléments antiques, terre, eau, air, ont été envisagés depuis Lavoisier comme des qualités physiques de la matière, solidité, liquidité, gazéité, au point que l'illustre savant avait prévu la liquéfaction de l'air, c'est-à-dire le lien étroit qui resserre ces états physiques. Si, par la pression, Faraday put, en 1823, liquéfier des gaz, ce moyen est insuffisant ; car certains gaz, à la température ordinaire, con-

servent d'une manière permanente leur état, même sous des pressions voisines de 10 000 atmosphères. Bien avant que Van der Vals eût démontré la nécessité de descendre au-dessous d'une température critique caractéristique pour chaque espèce, Bussy avait, en 1824, appliqué le refroidissement à la liquéfaction du gaz sulfureux et à celle de l'ammoniaque ; puis, grâce au froid produit par la volatilisation de ces liquides, il avait liquéfié le chlore. Sans doute l'extrême réserve de Bussy a fait quelque peu méconnaître l'importance de sa découverte. Cependant elle est devenue la base de la fabrication de la glace indispensable à l'industrie frigorifique imaginée par Ch. Tellier, industrie qui se chiffre annuellement par un mouvement d'affaires dépassant 15 milliards de francs, et le principe des refroidissements successifs de Bussy permet de liquéfier les gaz permanents. Les belles recherches de Cailletet en France et celles de Pictet à Genève ont démontré, en 1877, la possibilité de liquéfier l'oxygène en faisant succéder à la pression le refroidissement provoqué par la détente des gaz. Dans ces conditions Wroblewski obtint, en 1884, l'oxygène sous forme d'un liquide bouillant à — 192 degrés et que M. Dewar solidifia à — 225 degrés.

Aujourd'hui la liquéfaction de l'air par les appareils de Linde et par celui de M. Claude, qui utilisent l'un et l'autre la détente de l'air faisant suite à une pression de 200 atmosphères, est une opération industrielle. Rappelons que l'air liquide, soumis à l'évaporation spontanée, abandonne d'abord l'azote, et qu'après en avoir retiré l'argon et l'hélium, Ramsay, guidé par la classification des éléments, a cherché et trouvé dans les parties les moins volatiles de l'air liquide le néon, le krypton et le xénon ; tous gaz inertes, monoatomiques et caractérisés par des spectres très différents les uns des autres, ils forment la famille des argonides. En fait, si la liquéfaction de l'air a procuré le moyen de faire cette grande découverte, ce fut la classification des éléments qui l'inspira ; c'est donc sur ce point qu'il faut insister.

CLASSIFICATION DES ÉLÉMENTS La capacité atomique d'un élément pour l'hydrogène, qui sert à classer les métalloïdes, ne s'adapte pas aux métaux puisque ni leurs hydrures, fixes ou inconnus, ni leurs chlorures, dissociables, ne se prêtent aux déterminations de densité de vapeur. C'est pourquoi Thénard imagina sa classification utilitaire fondée sur la résistance des métaux à l'action de l'eau et de l'air. Les groupements obtenus concordaient avec les propriétés des sulfures métalliques, sur lesquelles repose sa méthode analytique restée en usage.

I. Les métaux nobles (genre or et platine), inoxydables, existent à l'état natif.

II. Ceux qui s'oxydent au rouge par l'air, mais non par l'eau, possèdent des oxydes facilement réductibles par le charbon : $2\text{CuO} + \text{C} \longrightarrow 2\text{Cu} + \text{CO}^2$.

III. Ceux qui s'oxydent à la fois par l'air et par l'eau au rouge, possèdent des minerais oxygénés assez difficiles à réduire : $\text{Fe}^2\text{O}^3 + 3\text{C} \longrightarrow 2\text{Fe} + 3\text{CO}$.

IV. Les métaux oxydables à froid par l'air et par l'eau possèdent des oxydes irréductibles au rouge, tous très actifs.

Ce fut la rectification des poids atomiques par Laurent, Gerhardt, Cannizzaro, jointe à la découverte des composés organométalliques volatils étudiés par Frankland, Cahours et Riche, qui suggéra ou, du moins, permit d'observer la notion de périodicité.

CCLASSIFICATION DE MENDÉLÉIEFF En 1862, Chancourtois le premier groupa les corps simples par ordre de grandeur du poids atomique, en les inscrivant sur une hélice (vis tellurique), pour faire apparaître la périodicité de certaines propriétés. Cette tentative fut reprise par Mendéléieff sous une forme plus heureuse. Inscrivant les uns à la suite des autres, par ordre de poids atomiques croissants, tous les éléments connus de son temps, l'hydrogène mis à part, le savant russe obtint une liste horizontale de sept corps jouissant de propriétés différentes. Le premier était un métal, le lithium, et le dernier un métalloïde, le fluor. Le huitième corps étant le sodium $\text{Na} = 23$, métal alcalin comme le lithium, Mendéléieff le plaça sous le lithium dans une deuxième ligne horizontale où le septième terme était le chlore $\text{Cl} = 35,5$, dont les analogies avec le fluor sont incontestées ; tandis que le quinzième corps, le potassium, doué des propriétés des métaux alcalins, fut inscrit en tête d'une troisième ligne horizontale dont le septième terme était le manganèse $\text{Mn} = 55$. De cette façon, les corps d'une même famille se plaçaient d'eux-mêmes les uns sous les autres dans les colonnes verticales.

Sans doute, le manganèse, qui est un métal, n'a pas d'analogies bien apparentes avec le chlore gazeux ; mais Mendéléieff répondait à cette objection en invoquant l'isomorphisme des perchlorates et des permanganates, et il énonçait hardiment cette loi bien connue : *les propriétés physiques et chimiques des éléments sont des fonctions périodiques des poids atomiques*.

Voici la cause de la vogue irrésistible bientôt acquise par cette classification. On était loin de connaître les nombreux corps simples isolés actuellement. Entre le calcium et le titane manquait le scandium ; à la suite du manganèse venaient le fer : $\text{Fe} = 56$, le nickel $\text{Ni} = 58,7$, le cobalt : $\text{Co} = 59$, qui n'ont aucune analogie avec le potassium ; puis le cuivre : $\text{Cu} = 63$, dont le sous-oxyde Cu^2O rappelle

par sa formule l'oxyde de potassium $K^2 O$. Se contentant de cette médiocre ressemblance, Mendéléieff mit ce métal en tête de sa quatrième ligne, tandis qu'il inscrivit le fer, le nickel, le cobalt à la suite de la troisième ligne, constituant une longue période. Dans la quatrième ligne, après le cuivre, le zinc : $Zn = 65,6$ trouvait sa place naturelle sous le calcium ; tandis que l'arsenic, $As = 75$ d'après les analogies s'inscrivait sous le phosphore. Deux cases entre le zinc et l'arsenic restaient vides.

Mendéléieff annonça qu'elles seraient comblées tôt ou tard et que d'ores et déjà, il pouvait décrire les propriétés de ces éléments inconnus. Celui qui appartient à la

Hydrog. H=1	Hélium 4 ←	Lithium 7	Glucin 9,1	Bore 11	Carbon 12	Azote N=14	Oxyg. 16	Fluor 19	
	Néon 20	Sodium 23	Magnés. 24	Alumin. 27	Silici. 28	Phosph. 31	Soufre 32	Chlore 35,5	
	Argon 40	Potass. 39	Calc. 40	Scand 44	Titane 48	Vanad. 51	Chrom. 52,5	Manga 55	Fer 56 ; Cob. 59 Nickel 59
	?	Cuivre 63	Zinc 65	?	?	Arsen. 75	Sélén. 78	Brome 86	
	Krypton 82	Rubid. 85	Stront. 87,5	Ytr. 89,6	Zircon 90	Niob. 94	Molyb. 95,8	?	Ruthén 105,5. Platine 106.
	?	Argent 108	Cadm. 112	Ind. 113	Étain 118	Antim. 120	Tellure 128	Iode 127	
	Xénon 128	Césium 132,6	Bari. 137	Lant. 138,5	?	?	?	?	
		?	?	?	?	Tant. 182	Tungst 184	?	Osm 190 Irid 192,5 Plat. 194,5
		Or 196,6	Merc. = Hg 200	Tall. 204	Plomb 207	Bism. 210	?	?	
	Eman. 222		Radium 226		Thorium 235		Uran. 240		

famille du bore, par exemple, doit être un métal fusible à basse température, ayant pour poids atomique 69 ; son oxyde, indifféremment acide ou basique, doit donner des aluns, etc... Vingt ans plus tard, Lecoq de Boisbaudran (1875) isolait le gallium, qui répondait point pour point à la description de Mendéléieff. La découverte du chimiste français eut un immense retentissement, et provoqua une série de recherches fécondes. Ce fut d'abord la découverte par Marignac (1878) du gadolinium et de l'ytterbium. Ces corps rentraient dans la famille du baryum. Alors que le scandium, isolé par Nilson (1880), complétait la famille du bore, et que le germanium de

Winkler (1885) parachevait la liste des éléments de la quatrième ligne. Passons sur les éléments tirés des terres rares ou monazites par Clèves et par Auer, connu par les manchons dont l'incandescence a révolutionné l'éclairage au gaz ; et sans insister sur les travaux de Demarçay et de M. Urbain, déjà mentionnés, revenons sur le point suivant : après la découverte de l'argon et de l'hélium dans l'air (1895), Ramsay, inspiré par la classification de Mendéléïeff, jugea que ces deux éléments inertes appartenaient à une série nouvelle existant dans l'air. Il soumit l'air liquide à une véritable distillation fractionnée, analogue à celle qui sert en chimie organique, et il isola une série de gaz simples inertes commençant à l'hélium et finissant au xénon (1896), ajoutant une nouvelle famille à celles du tableau de Mendéléïeff. Et tel est l'imprévu en matière d'applications que, deux ans plus tard, M. Claude utilisait le néon dans l'éclairage (lampes au néon), quand la rareté et l'inactivité chimique de ce gaz semblaient faire de lui pour longtemps un simple objet de curiosité.

Alors qu'en France on n'attribue à ce tableau qu'une valeur suggestive, on n'hésite pas en Angleterre à le considérer comme une doctrine fondamentale, malgré le choix arbitraire des analogies sur lesquelles il est établi : potassium et cuivre, manganèse et chlore, chrome et soufre se ressemblent moins que le manganèse, le chrome et le fer, qui donnent des aluns, des spinelles et deux séries d'oxydes basiques de forme MO et M^2O^3 , etc... Il y a plus : le nébulium de poids atomique 3, décelé par M. Fabry au moyen d'un procédé astrophysique qui rappelle la découverte de l'hélium, ne trouve pas sa place dans le tableau de Mendéléïeff.

HYPOTHÈSE DE PROUT Si la notion moléculaire indique l'ordre de grandeur des poids atomiques, c'est l'analyse qui précise leur valeur. Or les expériences de Leduc ont prouvé que, dans l'eau, la proportion de l'hydrogène H à l'oxygène O n'est pas 1 à 16. Ces nombres simples eussent fait des poids atomiques des multiples entiers de celui de l'hydrogène et, suivant la remarque du chimiste français Prout, une probabilité en faveur de l'unité de la matière. Cette conclusion paraît infirmée par les densités de vapeur observées par MM. Daniel Berthelot et Ph. Guye, par les travaux de MM. Noyes et Hinrichs. D'autre part, M. Richards et ses collaborateurs de l'Université d'Harward, corroborant les résultats obtenus par M. Leduc, ont définitivement fixé à la valeur 1,008 pour 16 le rapport des poids atomiques de l'hydrogène et de l'oxygène. Ils ont montré en outre que la plupart des poids atomiques inscrits au tableau de Mendéléïeff ne sont pas non plus des nombres entiers. Rapportées à 16 d'oxygène ou à 1,008 d'hydrogène, les élé-

ments de la sixième ligne ont pour poids atomiques : $\text{Ag} = 107,88$; $\text{Cd} = 112,4$; $\text{Ind} = 114,8$; $\text{Sb} = 120,2$; $\text{Tell} = 127,5$; $\text{Iod} = 126,95$.

Ceux des éléments trouvés dans les météorites par MM. Richards et Baxter sont identiques à ceux des mêmes éléments terrestres, par conséquent indépendants de leur origine. Il n'en est pas toujours ainsi. Les savants de l'Université d'Harward ont en effet constaté l'existence de deux espèces de plomb dont les propriétés métalliques et salines ne diffèrent en rien. Le poids atomique seul différencie ces espèces ; il est égal à 206 pour le plomb pur extrait des minerais radioactifs cristallisés, tandis qu'il est égal à 207,2 pour le plomb ordinaire extrait des minéraux non radioactifs, quelle que soit leur provenance. Telle est la notion d'*isotopie*, appuyée sur des analyses impeccables ; elle justifie la proscription des atomes par Dumas.

IV

LA CHIMIE DES HAUTES TEMPÉRATURES

MOISSAN : LE FOUR ÉLECTRIQUE Après l'expansion de la classification de Mendéléieff, la chimie minérale paraissait limitée à la recherche des cases à remplir et à celle de composés basiques ou salins, quand Moissan vit nettement toutes les ressources que la science pouvait tirer de la température de l'arc électrique, dont on commençait à se servir dans l'industrie. Il s'était déjà illustré par la découverte et l'étude du fluor, qu'il obtint par l'électrolyse du bifluorhydrate de potassium, après des recherches antérieures sur les fluorures métalloïdiques. Disons d'abord que dans l'isolement du fluor, le froid avait joué un rôle qui ramena Moissan à l'emploi des basses températures, quand plus tard il réalisa la synthèse des formiates par contact du gaz carbonique CO_2 avec l'hydruure NaH à -80 degrés en présence d'une trace d'eau. Celle des hydrosulfites, ensuite obtenue par l'action du gaz SO_2 sur le sodium dissous dans NH_3 liquéfié, fixa définitivement la constitution de ces sels découverts par Schutzenberger.

Frappé de l'importance des travaux de Deville, qui, à l'aide du chalumeau oxyhydrique, était parvenu à fondre le platine, et guidé par les conseils de M. Violle, Moissan construisit un appareil de chauffage destiné à utiliser le courant alternatif, en vue d'étudier systématiquement l'action de la chaleur seule, puis l'action combinée de la chaleur et du charbon sur une série de corps usuels. Ce

fut au moyen de ce four électrique qu'il observa, à la température de l'arc, la fusion et parfois la volatilisation de tous les oxydes métalliques, puis, après mélange avec du coke, la transformation de ceux-ci en carbures. Le plus important, celui de calcium $C^2 Ca$, devint, à partir de 1894 sous l'action de Bullier, la source industrielle de l'acétylène. Maquenne avait déjà constaté la production de ce gaz par l'action de l'eau sur un carbure de baryum obtenu en traitant par le magnésium un mélange de baryte et de charbon. Le remplacement de ce carbure par celui de calcium, et l'emploi du four à arc firent de l'acétylène un produit industriel.

A PPLICATIONS A cette haute température, le renversement des affinités devient général. Aussi Moissan a-t-il transformé en carbures, alors inconnus, les oxydes de lithium et ceux d'aluminium, de tungstène, de molybdène et d'uranium. L'affinage au four électrique de ces carbures en présence des oxydes des métaux correspondants, lui donna ensuite les métaux eux-mêmes, non plus en poussière, mais sous la forme métallique exigée par leur emploi actuel dans l'industrie. Un peu plus tard, il parvint à préparer le titane, plus difficile à isoler en raison de la formation et de la stabilité de ses composés azotés.

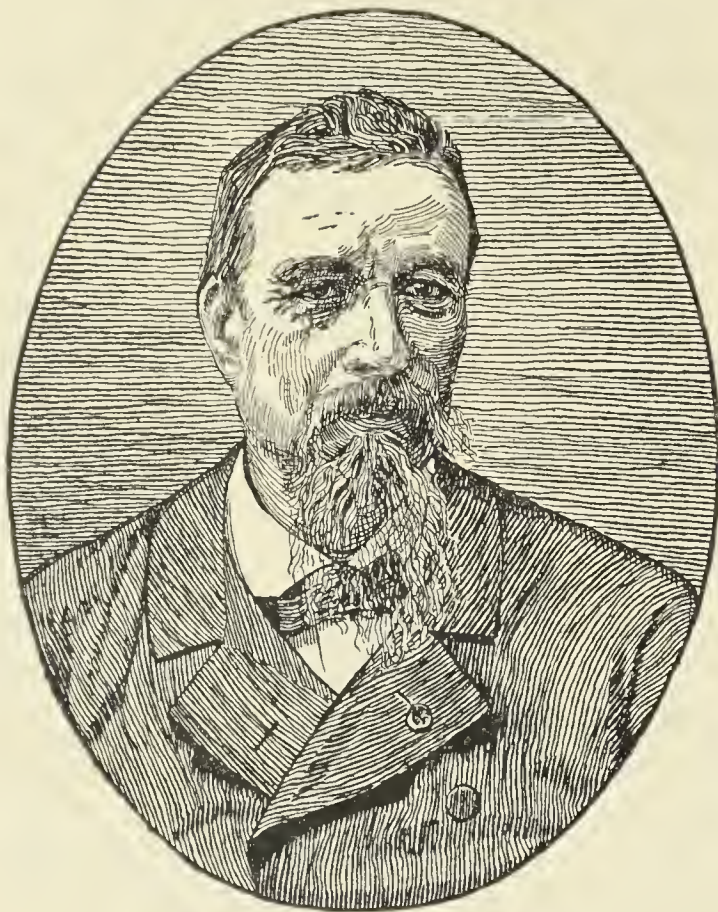


MOISSAN (1852-1907)

Non seulement l'affinité du carbone pour les métaux est intense à ces hautes températures ; mais l'hydrogène et l'azote ne sont plus, vis-à-vis des métaux, les corps inertes que nous avons coutume de concevoir. Leur affinité pour les métaux se manifeste avec une telle énergie, que Moissan a pu préparer un grand nombre de ces hydrures et de ces azotures définis et cristallisés. Il existe donc une chimie des hautes températures, sinon absolument différente de celle qu'on réalise dans les foyers ordinaires à charbon et à gaz, du moins tout à fait spéciale, dont l'importance s'est aussitôt affirmée par des résultats inattendus.

Cette véritable renaissance de la chimie minérale par l'introduction de méthodes nouvelles et la mise en œuvre de puissants moyens, eut la plus grande action sur

la métallurgie et sur l'extension de la chimie appliquée. Ainsi l'usage du carbure de calcium, limité d'abord à la préparation de l'acétylène dans l'éclairage, prit un rapide essor du jour où M. Vieille, en étudiant les dangers de l'acétylène comprimé, démontra qu'au-dessous d'une pression de 1 k., ce composé explosif perdait cette redoutable propriété. Au-dessous de cette pression la sécurité était



SCHUTZENBERGER (1827-1897)
Fondateur de l'École de Chimie et de Physique.

absolue. Elle s'élève jusqu'à 12 ks pour l'acétylène dissous dans l'acétone. Dans ces conditions, l'acétylène, devenu transportable et maniable, donnait au chalumeau oxyacétylénique un développement considérable, car il s'appliquait non seulement aux soudures autogènes, mais au sectionnement des plaques d'acier plus facile à faire sous le dard de la flamme que mécaniquement, procédé connu des cambrioleurs. L'application de l'acétylène à la fabrication de l'acide acétique et du caoutchouc, qui accroît dans une mesure énorme l'importance de ce gaz, sera développée au chapitre de la *catalyse*.

Moissan avait aussi étudié les déplacements réciproques du silicium et du carbone dans la fonte liquéfiée ; et la chimie des siliciures,

à l'instar de celle des carbures et des nitrures, profita de ses découvertes.

Les composés du carbone et du silicium avaient été caractérisés, dès 1888, par les travaux de Schutzenberger et Colson ; puis Schutzenberger obtint le carbure de silicium amorphe au four à vent. Le four électrique donna le composé cristallisé, le carborundum, dont l'emploi comme abrasif est aujourd'hui général. Obtenu pour la première fois en Amérique, le carborundum est préparé en France depuis 1900, à l'usine de laBathie (Savoie), par passage du courant à travers un mélange de silice et de charbon. La sidérurgie consomme toute une série de ferrosiliciums pour affiner la fonte au cours de sa transformation en acier et la transformer en fonte aciérée.

Ces siliciures se font couramment dans les Pyrénées et les Alpes à des teneurs de 25, 50, 75 et même 95 pour 100. Ce dernier, constitué par du silicium presque pur, a servi pendant la guerre à faire l'hydrogène utilisé par l'aérostation. Aussi la production française de ferrosiliciums dépasse-t-elle annuellement 50 000 tonnes.

De plus, certaines compagnies, comme celle des *Forges et Aciéries électriques Paul Girod*, à Ugine (Savoie), sont en mesure de livrer à notre métallurgie, à l'état de métaux purs ou de ferroalliages exempts de carbone, le manganèse, le tungstène, le chrome, le molybdène, le titane, le tantale et le vanadium qui lui sont nécessaires. Quant à la fabrication de l'acier au four électrique, elle est entrée dans la pratique courante, soit avec le four à acier Héroult, dans lequel l'arc traverse la couche de scorie sans pénétrer dans le bain de métal, soit avec le four oscillant de Paul Girod, soit avec le dispositif exploité avec succès par les établissements Schneider (Creusot).

Au four électrique, qui évite l'introduction d'impuretés sans gêner l'épuration, les métallurgistes réalisent la production d'aciers fins analogues aux aciers au creuset, même en partant de matériaux ordinaires. Enfin, on évite le grillage de la blende en traitant au four électrique ce minerai mélangé de débris de fer ou de fonte. Le zinc se dégage à l'état de vapeur, tandis que le fer et les métaux lourds fondent en une matte qui se sépare de la scorie plus légère. La récupération du cuivre contenu dans les minerais complexes est alors facilitée.

Dans une autre direction, l'application des azotures métalliques a été, de 1905 à 1914, l'objet d'efforts considérables. Outre la transformation du carbure de calcium en cyanamide calcique par Frank et Caro, la fabrication du nitrure d'aluminium en chauffant au four électrique, dans un courant d'azote, un mélange de bauxite et de charbon, donne l'azoture de Moissan ; ce corps, décomposé par la vapeur d'eau sous pression, engendre de l'ammoniaque et de l'alumine pure, propre à la fabrication de l'aluminium. Le procédé Coutagne, essayé dans ce sens à Moutiers en 1914, laissait espérer de bons résultats.

L'ÉLECTROLYSE DES CORPS FONDUS. APPLICATION A LA MÉTALLURGIE DE L'ALUMINIUM ET DES MÉTAUX ALCALINS

Dans l'adaptation des fours électriques à l'électrolyse des corps fondus, réalisée en 1886 par M. Héroult à l'usine de Froges, ce n'est plus la haute température, mais le courant continu qui intervient. L'alumine dissoute dans un bain de cryolithe AlF_3 , 3 NaF porté par le courant vers 960 degrés, doit être pure. Pendant son dédoublement par le courant, la cryolithe reste inaltérée, tandis que, sous l'action de l'oxygène libéré, l'anode en coke de pétrole aggloméré se consume, d'où la nécessité de le

rendre mobile. L'excellence du procédé Héroult a déterminé d'innombrables applications de l'aluminium, et il a fait de l'exploitation de la bauxite (alumine brute) une source de richesse pour la Provence.

Par son pouvoir réducteur, ce métal sert à l'affinage de l'acier et en aluminothermie, opération dans laquelle il agit sur des oxydes métalliques avec un tel dégagement de chaleur, qu'amorcée en un point du mélange par élévation de température, la réaction continue d'elle-même. Goldschmidt a préparé par ce moyen des métaux purs et exempts de carbone ; mais l'aluminothermie a surtout pour objet la réparation des pièces fissurées. D'autre part, M. E. Berger, répétiteur à l'École polytechnique, étendant l'aluminothermie à la décomposition des chlorures métalliques, obtint les fumées utilisées pendant la Grande Guerre, notamment dans l'attaque de Zee-Bruges par la flotte anglaise.

M^{AGNÉSIUM} En 1887, l'industrie allemande, inspirée par les travaux de Héroult et désireuse de mettre en œuvre le chlorure de magnésium résidu des mines de Stassfurt, obtenait le magnésium par électrolyse du chlorure fondu. La fabrication d'alliages durs et légers, le duralumin et le magnalium utilisés en aéronautique, jointe au besoin de bombes lumineuses, amena en 1915 la Société d'électrochimie à électrolyser le chlorure double de potassium et de magnésium plus fusible que le chlorure ; c'était imiter M. Guntz, qui avait obtenu le lithium par électrolyse d'un mélange de chlorures de potassium et de lithium.

Quant au sodium dont on tire les cyanures, le peroxyde et les oxydites de M. Jaubert, on l'obtient par électrolyse de la soude fondue.

É^{LECTROLYSE DES CORPS DISSOUS. RUOLZ, CHLORATES, POTASSE ÉLECTROLYTIQUE} Le déplacement électrolytique d'un métal dissous a conduit Elkington à la découverte de l'argenture galvanique en 1840. Systématisant l'emploi des cyanures doubles comme électrolytes, Ruolz introduisit dans l'industrie de l'argenture et de la dorure une régularité et une économie qui en ont fait une de nos belles industries (orfèvrerie Christoffe).

Cette méthode s'est étendue, vers 1880, à l'affinage des alliages d'argent et d'or

C^{HLORATES} En réalité, la première application de l'électrolyse à l'industrie chimique date de l'établissement, en 1887, par MM. Gall et de Montlaur, à Villers-sur-Hormes, de la fabrication électrolytique du chlorate de Berthollet. L'électrolyseur destiné à la production du chlorate est pourvu

d'un diaphragme, afin d'éviter la réduction du sel par l'hydrogène. La potasse caustique produite dans le compartiment cathodique est ensuite renvoyée dans le compartiment anodique pour y subir l'action du chlore à la température optima de 60 degrés maintenue par le courant électrique. Les lessives chloratées chaudes sont amenées aux cristallisoirs, déposent le chlorate puis, réchauffées et enrichies en chlorure de potassium, elles sont renvoyées au compartiment cathodique.

Le chlorate de soude est produit d'après les mêmes principes ; mais sa plus grande solubilité exige une concentration des lessives chloratées avant cristallisation. Le bas prix des chlorates électrolytiques a déterminé leur substitution à la dynamite dans les mines exploitant des roches de dureté moyenne, et dans la fabrication des grenades à main.

Les permanganates, les persulfates et même la céruse se font aujourd'hui par voie électrolytique.

BLANCHIMENT Dès 1882, Naudin, à Rouen, avait tenté d'utiliser l'électrolyse de l'eau salée au blanchiment des fibres végétales. Peu après, Hermite rendait ce procédé pratique en électrolysant sans diaphragmes une solution de chlorures de sodium ou de magnésium. Ce procédé sert actuellement au blanchiment de la pâte à papier.

POTASSE Alors que la soude s'obtient surtout par caustification du carbonate Solvay, livré à bas prix, la potasse électrolytique caustique se fait par électrolyse du chlorure KCl en solution concentrée. Les électrodes et les diaphragmes imaginés en 1898 par Outhenin-Chalandre et par Gall et de Montlaur permettent de séparer les chlorures alcalins en alcali et en chlore pur, liquéfié pour obtenir des substitutions chimiques ou des gaz asphyxiants.

V

CHIMIE DES COMPLEXES OU DES AFFINITÉS MOLÉCULAIRES

CHIMIE DES La conception des radicaux relègue au second plan les COMPLEXES phénomènes attribués à la cohésion moléculaire, dont l'hydrate de l'acide oxalique $C^2O^4H^2$, $2 H^2O$ et ceux du sulfate de soude SO^4Na^2 ,

sont des types. Cependant les expériences de Lœwel ont démontré que la cohésion entre l'eau de cristallisation et le solide n'est pas détruite par la dissolution, attendu que les hydrates du corps défini SO^4Na^2 ont une solubilité propre, et que d'autre part, la chaleur ne dissocie pas plus le méthylate $\text{CaCl}^2, 4 \text{C}^2\text{H}^4\text{O}$ que l'hydrate $\text{CaCl}^2, 2 \text{H}^2\text{O}$. Si donc l'union entre molécules définies est souvent précaire, son énergie est parfois comparable à celle qui assemble les radicaux. L'existence de ces *complexes* justifie la préférence de Dumas pour les radicaux isolables, dont les meilleurs exemples remontent à la découverte des ferrocyanures par Gay-Lussac. L'action directe du cyanure ferreux sur les cyanures alcalins :



lui avait fourni de nouvelles espèces chimiques où il ne retrouvait plus les réactions du fer ni celles du cyanogène ; elles constituaient de véritables sels de potassium, dont il isola un hydracide comparable à HCl , : $\text{Fe}(\text{CN})^6 \text{H}^4$.

Outre les ferro et les ferricyanures de Gay-Lussac, les sels doubles employés par Ruolz dans l'argenture et la dorure galvaniques, les cobaltamines basiques de Frémy, formées par l'action du gaz ammoniac sur les sels de cobalt, puis, dans la série du platine, les sels de Magnus et de Reiset et les chloroplatinates sont des complexes, auxquels s'ajoutent les fluosilicates, les fluotannates et les fluotitanates étudiés par Marignac, ancien élève de l'École polytechnique. Enfin, dans les nitrosulfures de fer découverts en 1858 par Roussin, les propriétés du fer sont dissimulées de la manière la plus complète ; ils forment un groupement dans lequel « le fer, le soufre et le bioxyde d'azote se réunissent en une molécule complexe », suivant l'expression même du savant pharmacien.

La chimie des complexes grandissait donc lentement à côté de la science des radicaux hypothétiques, dont l'éclat atténuait toute autre perspective. En usant de la thermochimie comme moyen d'investigation, M. Recoura donna à cette branche une nouvelle impulsion. En 1886, il débuta par l'étude des composés chromiques sous leurs deux aspects : les sels violets et les sels verts. Certains sels violets, comme les sulfates $(\text{SO}^4)^3\text{Cr}^2$, présentent tous les caractères des sels normaux, et les perdent en passant à l'état de sels verts, tandis que pour d'autres sels ce sont les composés verts qui sont normaux. M. Recoura, après avoir établi ce fait pour les chlorures et les acétates, isola trois formes anormales d'acétates dont les alcalis ne précipitent pas l'hydrate chromique ; l'une, biacide, $(\text{Cr} \text{C}^2\text{H}^3\text{O}^2) (\text{C}^2\text{H}^3\text{O}^2)^2$ est violette ; les deux autres, monoacides, se présentent sous deux états isomériques, vert et violet. Aussi les difficultés de ce sujet avaient-elles arrêté les chimistes étrangers ou fran-

çais, même quand ils avaient la valeur d'un Pélégot et l'habileté d'un Lœwel. Pour en triompher, il fallait en effet des méthodes nouvelles. Voici comment M. Recoura s'est servi de la thermochimie.

Par simple ébullition, la dissolution du sulfate violet normal devient verte ; mais deux molécules du sel normal se sont transformées en une molécule de sulfate basique soluble de composition $\text{Cr}^4\text{O}(\text{SO}^4)^5$ et en une molécule d'acide sulfurique libre décelée par l'addition successive de deux molécules de potasse dans la solution verte, et dont les dégagements de chaleur sont identiques à ceux que donnerait une molécule d'acide sulfurique libre. De plus, le sulfate resté en dissolution n'est pas un sulfate basique de l'oxyde normal $\text{Cr}^2(\text{OH})^6$; c'est le sulfate d'une base complexe $[\text{Cr}^4\text{O}(\text{SO}^4)^4](\text{OH})^2$, dans laquelle les quatre radicaux sulfuriques sont dissimulés, attendu qu'ils ne précipitent plus par les sels de baryte.

Ces constatations faites, M. Recoura les étendit. Au lieu de partir des dissolutions, il maintint le sulfate violet solide aux environs de 100 degrés. Dans ces conditions, ce sulfate normal verdit et, avec une partie de son eau de cristallisation, perd les caractères des sels de chrome. Si sa dissolution conserve la teinte verte, la thermochimie prouve qu'elle diffère de la dissolution bouillie : tout l'acide en effet y est dissimulé ; elle ne se prête plus aux doubles décompositions.

Il y a plus : tandis que les sels métalliques sont généralement saturés, la capacité de combinaison du sulfate vert solide se manifeste vivement. Il fixe d'autres corps pour donner naissance à des complexes d'un genre nouveau. Au contact de l'acide sulfurique ou d'un bisulfate quelconque, la conjonction des molécules donne les composés $[\text{Cr}^2(\text{SO}^4)^4]\text{K}^2$ ou $[\text{Cr}^2(\text{SO}^4)^4]\text{Cu}$, où tout l'acide sulfurique est dissimulé, même celui du sulfate métallique, tandis que le métal (potassium ou cuivre) reste sensible à ses réactifs ordinaires. Ce sont des composés d'un nouvel acide complexe, que M. Recoura nomme l'acide chromosulfurique, et qu'il compare aux acides ferro et ferricyanhydrique de Gay-Lussac. L'alun de chrome, isomère du sulfochromate potassique, reproduit le complexe sous l'action de la chaleur.

L'acide chromique lui-même se comporte comme l'acide sulfurique envers le sulfate vert anormal. Dans ses composés, l'oxyde de chrome et les acides chromique et sulfurique sont l'un et l'autre dissimulés. En outre, et nous voici loin des étroites limites assignées à la conception des sels doubles, le même sel vert donne encore un isomère de l'acide chromosulfurique. Le nouveau corps ne ressemble à aucun composé métallique connu. A l'inverse des autres combinaisons du chrome, il est à peine coloré et agit comme un nouvel acide bibasique qui précipite toutes les dissolutions des sels alcalins ou métalliques formant les sulfochromites de M. Recoura.

L'étude du sulfate ferrique a fourni au même savant d'autres complexes insoupçonnés. Après avoir démontré par des mesures thermiques que ce sel anhydre, en se dissolvant dans l'eau, met en liberté de l'acide sulfurique qui rentre en combinaison sous une forme isomérique pendant la dessiccation, il fit réagir le sel anhydre sur l'acide sulfurique, et obtint un acide ferrosulfurique, moins stable, il est vrai, que le composé chromique correspondant, mais susceptible de donner un ferrosulfate d'éthyle qui prouvait l'existence du complexe ferrosulfurique. Enfin, les chlorosulfates d'aluminium et de chrome $\text{Al SO}^4\text{Cl}, 6 \text{ H}_2\text{O}$ et $\text{Cr SO}^4\text{Cl}, 6 \text{ H}_2\text{O}$, découverts en dissolvant les sulfates dans l'acide chlorhydrique concentré, et où le chlore est dissimulé, du moins dans le dernier, montrent la variété et la portée des recherches de M. Recoura.

En joignant les données thermochimiques aux mesures cryoscopiques, M. Colson a constaté que le sulfate chromique vert obtenu par l'action du gaz sulfureux sur une dissolution d'acide chromique refroidie par de la glace, est isomère du sulfate violet ordinaire, bien que l'acide soit dissimulé dans le premier sel et non dans le second. Au contraire, dans le sel vert, préparé à 90 degrés, la molécule dissoute est double de celle du sulfate normal faite à zéro ; cependant l'acide sulfurique est dissimulé dans les deux cas. Le sel de Recoura est donc un polymère de l'autre sel vert ; il rappellerait le paracyanogène. Il en est de même pour tout sulfate vert obtenu par évaporation à chaud et redissous à froid.

Si l'on mesure l'acide dissimulé par voie thermochimique ou par pesée du sulfate de baryte précipitable, la concordance est satisfaisante ; mais elle n'a plus de rapport avec la valeur des conductibilités électriques qui, toutes choses égales, s'élève à 0,0078 pour le sulfate violet et environ à 0,0112 pour les sulfates verts à peine ionisés. Cette contradiction trouve un point d'appui dans les observations dilatométriques de M. Colson. La séparation en radicaux Cr et SO^4 exigée par le retour à l'état de sulfate violet précipitable, devrait augmenter le volume de la dissolution. Au contraire, on observe une contraction correspondant environ au volume occupé par une molécule d'eau pour chaque radical SO^4 mis en liberté sous la forme violette. M. Recoura vient encore (1922) d'indiquer la possibilité, dans une solution à 4 % SO^4K^2 , de dissimuler une proportion de 2 400 molécules de ce sel par addition d'une seule molécule de sulfate vert ; c'est supprimer l'ionisation du sel alcalin.

L ES COBALTAMINES ET LA RÉACTION DE LA CHIMIE
ORGANIQUE SUR LA CHIMIE MINÉRALE

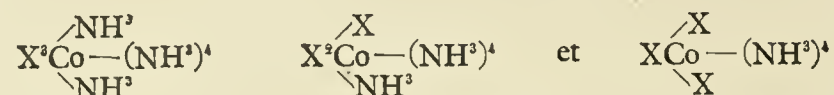
Ainsi l'emploi de la
thermochimie éclairait la

constitution des complexes. La dissociation électrolytique, exposée par M. Arrhénius

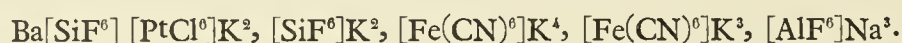
au congrès de physique (Paris, 1900), conduisait à des résultats semblables, grâce à une interprétation puissante des phénomènes de dissolution. Laissant de côté l'adaptation aux phénomènes électriques exposés par le savant suédois, on ne retiendra ici que la partie de ce travail la plus utile aux complexes. Le poids moléculaire groupe les notions de densité de vapeur, de cryoscopie, de tonométrie, de pression osmotique et de conductibilité électrique. Cependant les dissolutions aqueuses présentent des anomalies. Il semblerait qu'un sel fondu ou dissous dût être moins dissocié qu'à l'état de vapeur ; au contraire, d'après les modes de déterminations admis, il l'est davantage. M. Arrhénius suppose en effet que l'eau opère le dédoublement des sels dissous suivant les règles de la chimie unitaire, en groupements électropositifs et électronégatifs conservant chacun la charge électrique (nombre de coulombs) en rapport avec sa valence. Ainsi NaCl ou $\text{H}(\text{NO}^3)$ dissous se scindent en deux groupes Na et Cl, H et NO^3 , tandis que SO^4Na^2 fournit les trois ions SO^4 et $\text{Na} + \text{Na}$. Remarquant que la conductibilité des solutions très étendues est proportionnelle aux nombres des ions, quelle que soit leur charge, ainsi qu'à l'abaissement cryoscopique et aux pressions osmotiques, M. Arrhénius dotait la chimie d'un moyen d'investigation moléculaire extrêmement pratique. Par exemple, la détermination des conductibilités des deux sels Pt Cl^4 et 2 NaCl observés séparément en solutions étendues, est proportionnelle à 9, car elle correspond à $5 + 2 \times 2 = 9$ ions, tandis que dans le mélange des sels la conductibilité tombe à 3, décelant la formation d'un composé très condensé, ne contenant plus que trois ions ; c'est le complexe $[\text{Pt Cl}^6] \text{Na}^2$ dans lequel les ions Na saturant l'ion $[\text{Pt Cl}^6]$ caractéristique des chloroplatinates, comme ils saturant l'ion SO^4 du sulfate $(\text{SO}^2) \text{Na}^2$.

Dans un mémoire de 1851, Frémy, ayant décrit une vingtaine de sels doubles provenant de l'absorption du gaz ammoniac par les sels de cobalt, remarqua que le chlorure purpuréo-cobaltique ne cède la totalité de son chlore au nitrate d'argent qu'à l'ébullition. Cette observation s'ajoutait au fait analogue constaté sur les ferrocyanures, dans lesquels le cyanogène est pareillement dissimulé aux réactifs. La découverte des composés ammoniés du chrome par Frémy (1858), développée par Clèves en 1862, puis par Favre et Valson, ayant complété cette série de sels doubles, les savants scandinaves, Blomstrand et Jørgensen surtout, établirent que l'acide sulfurique déplace à froid le chlore non dissimulé dans les corps de Frémy, et que l'eau est susceptible de remplacer partiellement l'ammoniaque dans les cobaltamines. Utilisant les déterminations physico-chimiques de J. et E. Petersen,

et désignant par X un radical acide de forme Cl, Br et NO², ils firent trois groupes de ces corps :



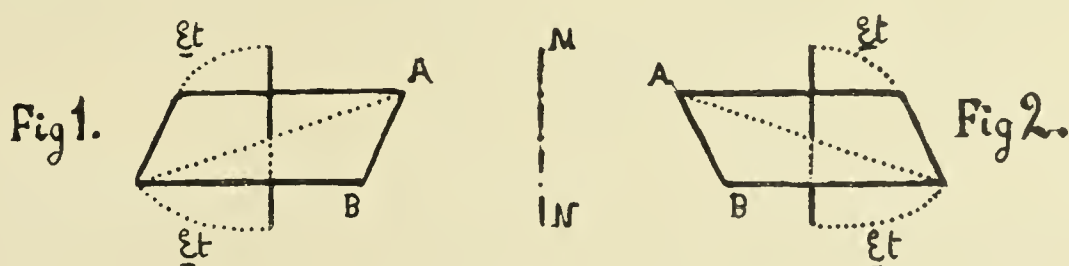
Sans s'arrêter à l'hypothèse du chlore trivalent — Cl = Cl —, invoquée par Blomstrand pour expliquer les faits, M. Werner, de l'Université de Zurich, distingua dans ces groupes les valences principales qui s'exercent entre radicaux, et les valences secondaires qui retiennent en combinaison des molécules saturées comme H²O, NH³, (NO²)... Il admit ensuite qu'une molécule NH³ ou H²O est dissimulée quand elle est directement liée au cobalt, et qu'il en est de même du chlore dissimulé ; de sorte que, dans la saturation du métal, Cl équivaut à H²O, ou à NH³... De plus l'indice de coordination représente le nombre des radicaux et des molécules liés au même atome central Co pour constituer non plus le complexe, mais son radical salin généralement polyvalent, et mis entre crochets dans les sels alcalins ci-dessous :



L'atome central Pt, Si, Fe ou Al, qui groupe six atomes ou radicaux, a pour indice de coordination le nombre 6, et le groupe forme le radical électro-négatif du sel complexe. Ce fait, que Gay-Lussac démontrait par de doubles décompositions chimiques, se constate aujourd'hui plus facilement par la mesure de la conductibilité électrique, comme on vient de le lire. La cryoscopie et la tonométrie servent également au contrôle moléculaire constitué par un radical [MX⁶] uni à K², à Na² ou à Ba.

En 1912, M. Werner a précisé, devant la Société chimique de France, la disposition des groupes X coordonnés par le cobalt, et il a montré comment elle se prête à la théorie de M. Le Bel. Si les six groupes coordonnés A sont identiques dans un complexe, ils jouent le même rôle, et le remplacement dans MA⁶ d'un des constituants A par un autre B ne fournira jamais de composé isomérique. Ce fait s'exprime par une disposition symétrique des six groupes A par rapport à l'atome M placé au centre du schéma. Une telle figuration se rencontre soit dans un hexagone, soit dans un prisme, soit dans un octaèdre réguliers. Les deux premiers schémas font prévoir trois isomères pour un radical complexe de forme [B²MA⁴]; mais le dernier seul correspondant à deux formes isomériques. Or l'examen d'une trentaine de complexes cobaltiques bisubstitués [B²CoA⁴]

n'a jamais décelé plus de deux isomères stéréochimiques. C'est donc la forme octaédrique qui convient à l'expression des faits. Dans les schémas de ce genre, si les deux groupes B occupent des positions opposées (extrémités d'un diamètre de la sphère circonscrite) ils sont dits en position *trans*; s'ils sont rapprochés (extrémités d'un côté de l'octaèdre), ils sont dits en position *cis*. Ces formes *cis* et *trans*, n'étant évidemment ni superposables, ni symétriques, correspondent à des isomères inactifs comparables aux acides maléique et fumarique. Mais, à côté de ces formes *cis* et *trans*, d'autres schémas non superposables sont concevables; et s'ils présentent la symétrie pasteurienne, ce sont alors des isomères actifs. M. Werner les a obtenus en remplaçant dans les cobaltamines deux molécules d'ammoniaque monobasique par une molécule d'éthylène-diamine bibasique, figurée par le symbole Et



Une double opération de ce genre conduit à la figure (1) dont la figure (2) représente l'image spéculaire, vue dans la glace désignée par MN. Ces deux figures n'étant point superposables, la substitution de l'éthylène-diamine à l'ammoniaque pouvait déterminer la formation d'isomères stéréochimiques actifs sous la forme racémique, et pour séparer les cobaltamines racémisées, il suffisait, conformément à la prescription de Pasteur, d'ajouter un acide actif. M. Werner, guidé par ces considérations, choisit l'acide sulfocamphorique de Reyckler qui, étant dextrogyre, devait précipiter la cobaltamine lévogyre. Cette expérience finale ratifia la belle extension des théories chimiques conçues par M. Werner, qui constata que le pouvoir rotatoire de quelques-unes de ces bases minérales est très supérieur à celui des composés organiques.

Ce retour aux radicaux isolables dénote l'insuffisance des radicaux habituels pour expliquer tous les phénomènes de la chimie, et montre que la notion de valence n'est qu'une première approximation.

M. Werner a étendu ses observations au fer et au chrome. Ce rapprochement constitue une analogie manifeste entre ces métaux et le cobalt, qui sont séparés dans la classification de Mendéléïeff. Antérieurement l'isométrie pasteurienne et la

stéréochimie de Le Bel avaient suggéré à Pope et Peachey la découverte des composés stéréochimiques actifs de l'étain et du soufre, supposés tétravalents. Nouvel exemple du caractère relatif des notions de valence et d'analogie !

DUALISME ET CATALYSE Les expériences de M. Recoura et celles de M. Werner marquent un retour au dualisme en établissant que des corps réels et même saturés s'unissent au même titre que les radicaux monovalents et, comme eux, peuvent communiquer le pouvoir rotatoire aux métaux. Elles restaurent la conception des radicaux préconisés par Dumas et dont la catalyse serait le mécanisme. L'idée d'une force catalytique développée par des corps qui par leur seule présence déclenchent des actions chimiques latentes, fut suggérée à Berzelius par la brusque décomposition de l'eau oxygénée, par les corps poreux, par l'incandescence du platine à l'air sous l'influence d'un jet d'hydrogène, par la transformation indéfinie de l'amidon en sucre ou de l'alcool en éther sous l'action d'une petite quantité d'acide sulfurique.

Le mot catalyse n'explique rien, il indique un mode d'action sur lequel une première lueur fut jetée par Clément et Desormes. Loin d'être un corps passif, le catalyseur possède une double activité que les deux savants ont constatée à propos de la fabrication de l'acide sulfurique. Dans ce cas une petite quantité d'acide nitrique transforme une quantité indéfinie de gaz sulfureux en acide sulfurique à condition de faire intervenir l'eau et l'air nécessaires à cette transformation. Au contact de l'eau, l'acide nitrique cède immédiatement son oxygène au gaz sulfureux et se change en oxyde nitreux qui, par sa propriété de fixer instantanément l'oxygène, recouvre l'état nitrique, rouvrant le cycle des opérations dès qu'il rencontre une nouvelle quantité de gaz sulfureux et d'eau.

Cette explication fut étendue vingt ans plus tard par Williamson à l'éthérification, comme nous l'avons dit ; puis Berthelot montra que l'action des oxydes métalliques sur l'eau oxygénée tient à leur suroxydation passagère par ce liquide.

A cette interprétation de la catalyse, s'ajoute l'effet de pression dû à la porosité des catalyseurs, explication qui découle des observations de M. Lemoine sur l'accroissement de vitesse des réactions par les corps poreux agissant dans le sens de la pression. Cette explication s'est propagée à l'étranger sous le nom d'*adsorption* et M. Marcel Guichard a montré (1910-1914) toute l'importance de ces phénomènes d'occlusion du gaz et des vapeurs par les solides.

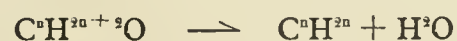
Les faits suivants, observés par M. Colson en 1909, démontrent que certaines catalyses restent mystérieuses et impossibles à prévoir. Dans la préparation clas-

sique des éthers oxydes tels que le phénate d'éthyle, $C^6H^5-O-C^2H^5$, Cahours traitait les salicylates d'alkyles par la chaux, intervenant par son affinité pour CO^2 comme dans la transformation de l'acide benzoïque en benzine. Il écrivait : $HO-C^6H^4-CO^2-C^2H^5 + Ca O \longrightarrow CO^2Ca + C^2H^5-O-C^6H^5$.

Cette explication est parfaitement conforme aux affinités chimiques et au principe du travail maximum. Cependant, à la température de 165 degrés en tube scellé, la chaux grenue n'est pas attaquée, et l'acide carbonique s'accumule dans le tube exerçant une pression qui peut être dangereuse mais qui disparaît à la longue. La chaux agit donc par catalyse, quoique le dégagement de chaleur présente une infériorité de 45 000 calories sur celui qui correspond à l'action chimique de la chaux incontestable en apparence et généralement admise.

Malgré la catalyse de l'adéhyse qui conduisit Wurtz à isoler l'aldol, découverte dont la généralisation eut tant d'influence sur la synthèse des sucres, malgré les catalyses par le chlorure d'aluminium imaginées par Friedel et Crafft, qui ont amené A. Combes à la connaissance de l'acétylacétone, malgré les travaux étrangers, la catalyse ne prit sa valeur méthodique qu'à la suite des travaux de MM. Sabatier et Senderens (1897-1905).

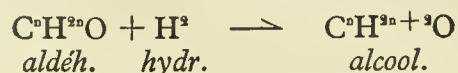
Sous l'action catalytique, les alcools primaires et secondaires sont susceptibles de perdre de l'eau ou de l'hydrogène pour se transformer en carbures éthyléniques dans le premier cas, et dans le second en aldéhyde ou en acétone. Personne ne soupçonnait la possibilité d'un dédoublement moléculaire direct tel que $C^2H^6O \longrightarrow C^2H^4O + H^2$; car jusqu'à 400 degrés aucune décomposition de l'alcool n'apparaît; mais, au contact du cuivre réduit à basse température, ce dédoublement se poursuit régulièrement entre 250 degrés et 350 degrés, tandis que la présence des oxydes de thorium et d'aluminium détermine la séparation des alcools en eau et éthylènes :



Cette dernière transformation est, d'après M. Senderens, particulièrement rapide au contact du silicate ou du sulfate d'alumine anhydre; mais alors la déshydratation des alcools primaires donne simultanément des éthers oxydes, de même que leur déshydrogénation est facilitée par l'argent divisé.

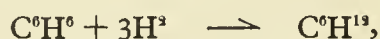
L'action du nickel pulvérulent sur les alcools les dédouble encore mieux en aldéhyde et hydrogène, parfois accompagné d'une production d'oxyde de carbone. Déjà sensible à 130 degrés sur l'alcool ordinaire, elle détruit à 180° le tiers de l'aldéhyde libéré, et la totalité à 330 degrés.

La mousse de platine détermine la décomposition de l'alcool à 260 degrés, l'active à 270 degrés en transformant les trois quarts de l'aldéhyde en oxyde de carbone et en méthane. Bref, ces dédoublements obtenus par MM. Sabatier et Senderens sont variables avec le catalyseur et, en réglant la température, on détermine l'action inverse :

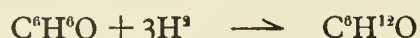


où n'interviennent que des corps saturés définis, comme dans les complexes minéraux.

La catalyse par le nickel a donné à MM. Sabatier et Senderens d'autres résultats inattendus. Non seulement la benzine en vapeur absorbe l'hydrogène au contact du métal réduit pour donner le cyclohexane

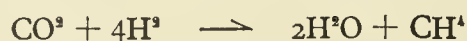


mais tous les dérivés aromatiques absorbent l'hydrogène libre avec la même facilité, alors que les autres moyens se montrent impuissants. Par exemple, le phénol se transforme en cyclohexanol, qui est l'alcool du cyclohexane



De même les bases cycliques comme la quinoléine se changent en tétrahydroquinoléine, fait capital pour la synthèse des alcaloïdes.

L'action du nickel produit même des phénomènes de substitution. Ainsi l'acide carbonique est susceptible de se changer en méthane par l'hydrogène



Cette réaction a été indiquée par M. Sabatier pour obtenir le méthane et d'autres carbures dont il comptait tirer des succédanés du pétrole.

Ce ne sont pas seulement des résultats de laboratoire que donne la molécule H^2 au contact du nickel réduit ; les efforts de M. Sabatier ont abouti à des applications industrielles. Ainsi l'acide oléique est devenu l'objet d'une nouvelle industrie, doublement importante puisqu'elle touche à l'alimentation. Ce résidu des stéarinerie $\text{C}^{18}\text{H}^{34}\text{O}^2$ diffère de l'acide stéarique $\text{C}^{18}\text{H}^{36}\text{O}^2$ par défaut d'hydrogène. Or, en présence du nickel réduit, il absorbe H^2 vers 100 degrés, surtout lorsqu'on fait intervenir de fortes pressions, qui accélèrent les réactions d'après

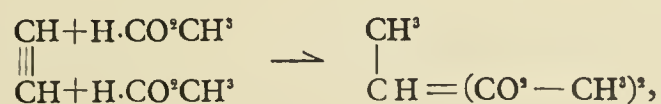
les observations anciennes de M. Lemoine et celles, plus récentes, de M. Ipatieff. En vingt-quatre heures l'acide oléique est changé en acide stéarique pour bougies, et les huiles de qualités inférieures en graisses solides et inodores, les cocoses.

VARIÉTÉ DES RÉSULTATS CATALYTIQUES. ALCOOL Naturellement ces adjonctions de composés définis sont facilitées quand un des corps possède des valences libres. Avec un mélange d'eau et d'acétylène au contact de sels mercuriques dissous, Kutcheroff avait obtenu, en 1881, l'aldéhyde éthylique et l'acide acétique. Envisagée comme une catalyse et mise au point, cette opération est riche en surprises. En empêchant la réduction du sel mercurique au moyen de sulfate ferrique, la production d'aldéhyde devient continue ; mais il convient d'opérer en solution acétique, puis d'ajouter progressivement la quantité théorique d'eau nécessaire à la formation de l'aldéhyde en entraînant ses vapeurs par un excès d'acétylène.

Enfin la transformation en alcool de l'aldéhyde se fait par l'hydrogène soit au contact du nickel réduit, soit par la voie électrolytique.

A CIDE ACÉTIQUE L'oxydation directe de l'aldéhyde par l'air au contact des catalyseurs est aussi facile. A froid on peut même obtenir suroxydation et production d'acide peracétique détonant sous une faible élévation de température. A la compagnie d'Alais, on opère vers 100 degrés en présence d'un excès d'acide acétique, sans catalyseur, alors qu'on catalyse par de l'oxyde de manganèse pulvérulent dans les usines canadiennes signalées à propos des acétates de cellulose.

M. Boileau ayant découvert que, vers 75 degrés, l'acide acétique se combine à l'acétylène en présence d'acétate de mercure et de sulfate de méthyle pour former de l'acétate d'éthylidène :



les usines du Rhône ont dédoublé ce produit en aldéhyde et anhydride acétique par des catalyseurs, tels que le pyrosulfate, l'orthophosphate de soude et l'acide métaborique : fait très important pour la fabrication de l'acéto-cellulose.

L'ALDOL Ce composé, découvert par Wurtz, est aujourd'hui obtenu plus rapidement par l'action catalysante de l'amalgame de calcium ou des cyanures alcalins sur l'aldéhyde. Transformé en butane-diène, il devient la source principale de la matière première nécessaire à l'obtention de l'isoprène et des caoutchoucs synthétiques, ainsi rattachés à l'acétylène.

YPÉRITE Après l'attaque allemande d'Ypres par les gaz asphyxiants, les chimistes français ont reproduit l'ypérite (gaz moutarde), par fixation directe de deux molécules d'éthylène sur le chlorure de soufre :



Par ce procédé expéditif ils ont remédié à l'insuffisance de nos usines de produits chimiques, qui avaient à lutter avec la puissante industrie allemande, où l'ypérite se faisait en partant du glycol de Wurtz.

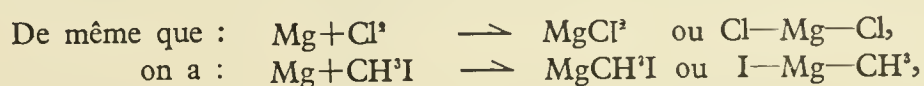
Pour montrer toute la portée des découvertes de MM. Sabatier et Senderens, il convient d'ajouter que ces savants ont fait école, suscitant de nombreuses recherches et, par leurs succès répétés, entraînant dans leur sillon des maîtres comme M. Matignon et comme M. Kling, l'éminent directeur du laboratoire municipal de Paris, dont l'habileté fut si précieuse pendant la guerre et que préoccupent aujourd'hui les questions d'actualité, parmi lesquelles la production de l'essence indispensable aux moteurs d'avions tient une place importante. Déjà, M. Sabatier a breveté, dans ce but, le dédoublement des pétroles lourds par contact avec le fer porphyrisé, mais la combinaison directe du charbon à l'hydrogène semble possible. En outre, le grand nombre de résultats pratiques et inattendus, auxquels aboutit la catalyse et devant lesquels les pures méthodes chimiques restent impuissantes, dépendent de la nature du catalyseur, sans qu'il soit toujours possible d'en indiquer le mécanisme, de sorte qu'on est conduit à constater que nos formules moléculaires, si logiques et si suggestives, sont cependant incapables d'exprimer toutes les propriétés d'un composé, et que la mécanique chimique actuelle, basée sur les mesures thermiques, manifeste la même impuissance. Par exemple la formule $\text{CH}^3 - \text{CH}^2 - \text{OH}$ de l'alcool met en évidence les analogies de ce composé avec la potasse et la possibilité de donner un acide en y remplaçant H^2 par O divalent ; elle a fait prévoir l'existence du glycol, etc., etc., mais elle ne permet pas de soupçonner la séparation catalytique de l'alcool en $\text{CO} + \text{CH}^4 + \text{H}^2$ surtout

vers 250 degrés. Il semble au contraire que la catalyse soit en état de libérer tous les corps définis que l'on peut *mettre en évidence* dans une molécule, indépendamment de la constitution de celle-ci.

Si la nature du catalyseur est en rapport avec les produits de transformation, on conçoit mal le rapport qui existe entre les causes mécaniques ou thermiques et la multiplicité des modes de décomposition déterminés par un même catalyseur à des températures inférieures à celles qui provoquent la décomposition du corps catalysé. Ainsi la catalyse avertit de la fragilité du plus merveilleux édifice scientifique : la chimie moléculaire.

M^{ÉTHODE}
GRIGNARD Les méthodes synthétiques de M. Grignard mettent également en jeu des molécules réelles et montrent qu'elles peuvent se souder les unes aux autres comme les radicaux, c'est-à-dire comme les corps simples d'après la note de Dumas et Liebig.

La formation des composés essentiels aux réactions de M. Grignard témoigne de ce rapprochement, surtout en maintenant le symbolisme de la valence.



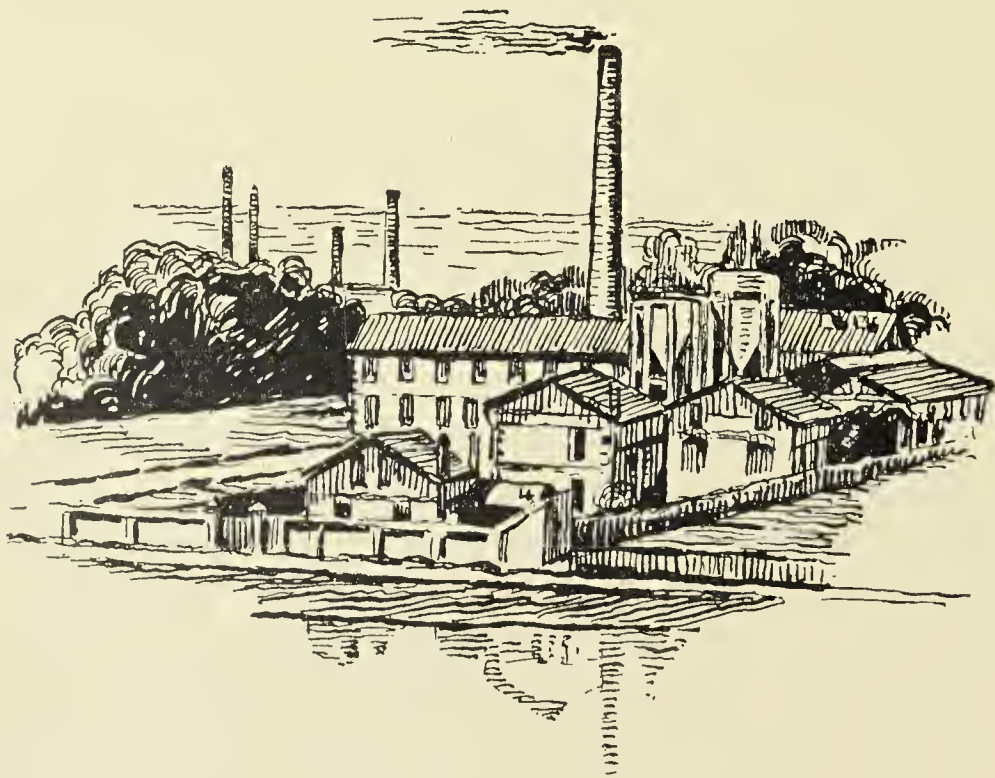
l'iodure CH^1I pouvant être remplacé par un autre iodure alcoolique.

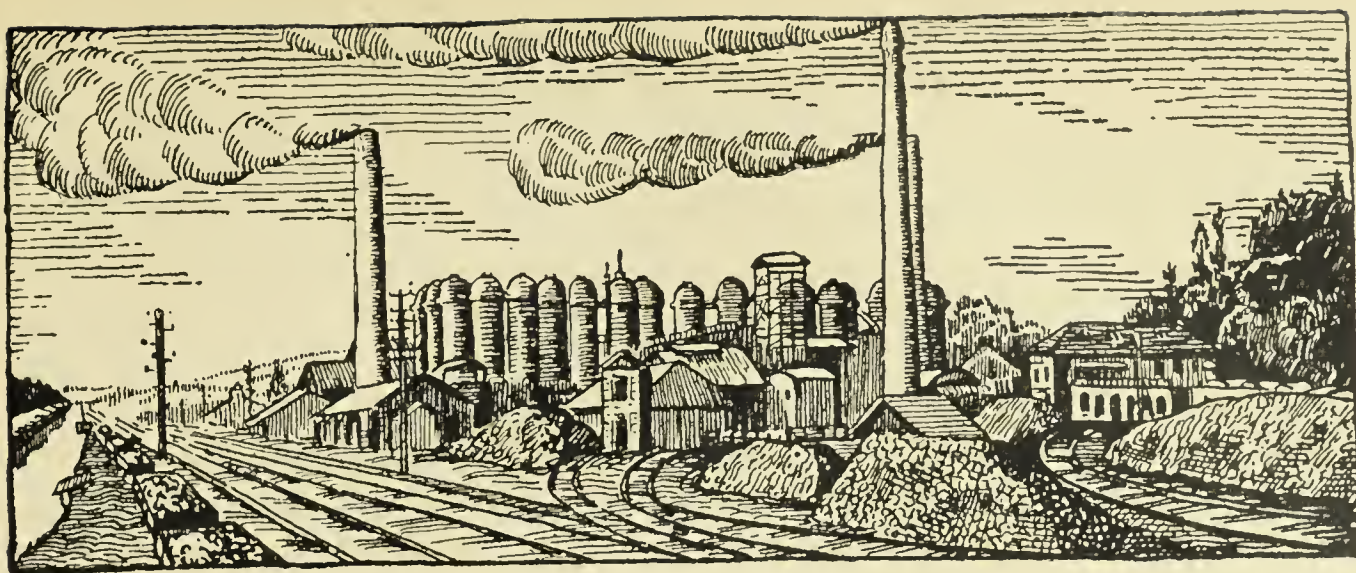
Une autre ressemblance ressort de l'affinité de l'eau pour Mg Cl^2 , tout à fait analogue à l'affinité de l'éther pour le composé organo-magnésien formé au sein de ce liquide, car à 200 degrés l'éther reste combiné, donnant par surélévation de température l'hydruure de magnésium Mg H^2 , comme l'a montré M. Jolibois. Toutefois ce composé éthéré se comporte comme une molécule organométallique libre et se fixe instantanément sur un grand nombre de molécules organiques aldéhydes, acétones, amines, gaz CO^2 , etc... Les composés moléculaires très résistants à l'état sec, donnent à leur tour, sous l'action de l'eau, de nouveaux corps qui appartiennent à des séries homologues des composés réagissants. Par exemple la fixation de CO^2 sur un alkyle en C^n donnera un acide relevant de la série en C^{n+1} . Parmi toutes ces actions en nombre presque illimité et qui s'expliquent par le jeu des valences, développons une des plus simples : l'adjonction de la molécule CO^2 au méthyl-iodure de magnésium



où l'on voit, par intercalation directe de la molécule CO^2 entre Mg et CH^3 , se former un iodoacétate qui, par l'eau, se dédouble aussitôt en iodure et acétate de magnésium. Aussi le nombre des réactions provoquées par cette méthode est illimité. Il convient de rappeler que M. Barbier a le premier préféré le magnésium au zinc dans la substitution des radicaux alkyles employés à l'état d'iodures.

A la suite d'études personnelles ou en collaboration avec M. Béhal et M. Blanc, sur les dérivés du camphre, M. Blaise avait vu que la méthode de M. Grignard transformait la fonction nitrile en une fonction acétonique. Dans le but de modifier l'action souvent excessive des composés organomagnésiens, il fut ramené aux propriétés mixtes du zinc, dont M. Barbier s'était initialement servi. Ayant découvert un procédé commode et général de préparation des composés mixtes du zinc, il appliqua ces dérivés à l'obtention de produits d'addition susceptibles de dédoublements spéciaux et découvrit, parmi d'autres remarquables transpositions, celle du groupe CO^3H .





CHAPITRE V

LA MÉTALLURGIE ET SES METHODES

I. Le fer, la fonte et l'acier. — Méthodes d'investigation de M. Osmond. — Fonte aciérée; procédé Prache. — II. La métallurgie du cuivre.

I

LE FER, LA FONTE ET L'ACIER



LORS que le fer et l'acier étaient connus des anciens, la fonte était totalement ignorée au moyen âge ; les fours en usage ne permettaient pas sa formation. Il fallut les fours à cuve, qui apparurent au seizième siècle dans les Pays-Bas et qui, introduits d'abord en Suède, puis en Angleterre, se propagèrent partout à la fin du dix-septième siècle. Imités des fours catalans, les hauts fourneaux étaient construits en maçonnerie et de faible hauteur. Leur mise en marche hâtait la destruction des forêts et provoquait les édits d'Élisabeth ordonnant de limiter le déboisement. Si la substitution du combustible minéral au charbon de bois date du brevet octroyé en 1611 par Jacques I^{er} à Sturtevant, ce fut seulement en 1735 que Darby fit couramment de la fonte, dans son usine de Colebrook, au moyen du coke retiré de la houille. Son haut fourneau avait 10 m. 65 de hauteur, marchait au coke et produisait 25 tonnes de fonte par

semaine en 1745. Puis les premières machines soufflantes (1765) et l'utilisation d'air chaud (1823) vinrent successivement accroître le rendement du haut fourneau. Mais le grand abaissement du prix de la fonte est dû à l'utilisation des gaz résultant de la réduction du minerai, c'est-à-dire d'un sous-produit atteignant aujourd'hui la valeur de la fonte elle-même. Aubertot, propriétaire d'usines dans le Cher, dès 1811 sut tirer parti de ces gaz pour fabriquer des briques, de la chaux et de l'acier cimenté. Loin de chercher un profit personnel dans ses brevets, il s'appliqua à les vulgariser. Grâce à ses généreux efforts, ses procédés se répandirent rapidement en France, et plus tard en Angleterre. En 1840, Taylor, de Marseille, en chauffant les chaudières à l'aide des gaz du haut fourneau, abaissa dans une proportion considérable le coût de la force motrice nécessaire au fonctionnement des compresseurs. Enfin, en 1845, Palmer Budd commença à utiliser la chaleur produite par la combustion des gaz pour chauffer l'air envoyé aux tuyères, en employant un échangeur de température à double circuit, dont l'un était traversé par les gaz de la combustion, et l'autre par l'air à réchauffer. Ce fut le point de départ des récupérateurs Whitwell, actuellement employés sous la forme d'empilages de briques alternativement traversés par les gaz chauds et par l'air à réchauffer.

En dépit du théoricien qui proscriit l'agrandissement des hauts fourneaux, leur capacité augmente au point qu'on construit dans l'Est et dans l'Ouest de la France des appareils capables de traiter jusqu'à mille tonnes de minerai produisant quatre cents tonnes de fonte par vingt-quatre heures ; dans ces énormes fours, toutes les opérations se font mécaniquement, car le chauffage du récupérateur n'exigeant guère que le tiers des gaz qui s'en échappent, on emploie le reste à la mise en marche de moteurs à gaz dont la puissance procure l'énergie mécanique et l'éclairage électrique indispensables au fonctionnement du haut fourneau et à celui des aciéries qu'on y adjoint. Pour atteindre la perfection du procédé, les efforts des spécialistes se portent sur le coke métallurgique, qui exige des charbons de qualités spéciales assurant au coke, outre la résistance à l'écrasement, la possibilité de brûler à une température peu élevée, afin d'en réduire la quantité consommée pour une même production de fonte. Les améliorations qui pourront être obtenues sur ces points spéciaux offrent un intérêt capital pour la France, qui dispose d'usines puissantes et d'immenses réserves de minerai de fer, mais dont les ressources en charbon propre à la fabrication du coke métallurgique sont limitées, de sorte qu'il faut en chercher le complément en Westphalie.

La quantité de fonte produite annuellement dans le monde entier dépassait

60 millions de tonnes en 1913. La proportion employée pour le moulage des objets de fonte tend toujours à diminuer. De plus en plus, la fonte sert à produire l'acier, facteur essentiel de la civilisation moderne.

Jusqu'en 1890, le laitier, constitué par la partie stérile des minerais rendue fusible par l'addition de calcaire, était considéré comme un produit sans valeur et encombrait les abords des usines métallurgiques. A partir de cette date, le laitier, granulé par coulée directe dans l'eau, puis mélangé avec une certaine proportion de chaux, fut transformé en briques ou en ciment, comme nous l'avons vu. De ce chef, le prix de revient de la fonte fut encore abaissé.

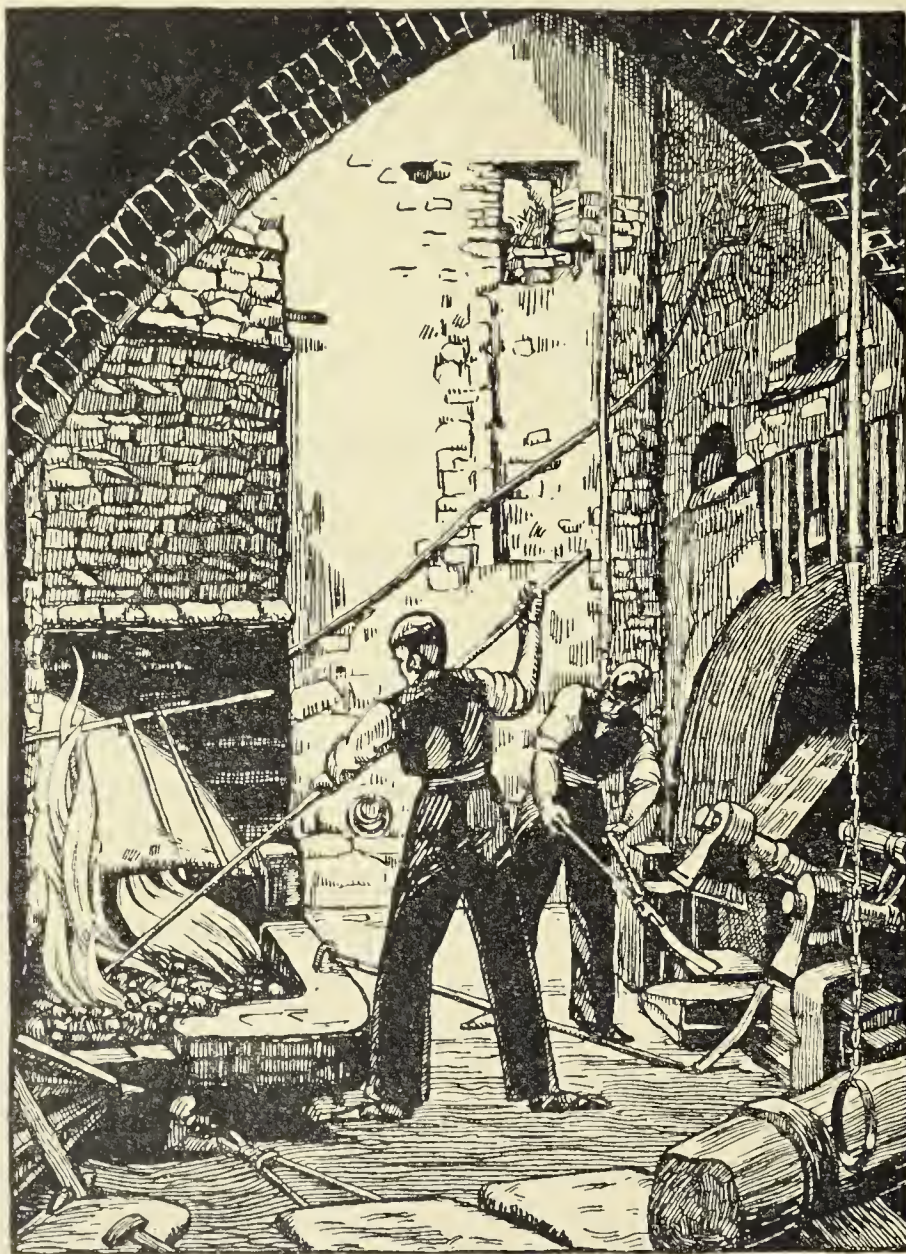
L E FER, LA FONTE ET L'ACIER

Bien que le fer n'ait été connu qu'après le cuivre, son emploi, même celui de l'acier, est signalé dans l'*Illiade*. S'il est vrai qu'Alexandre reçut de Porus un présent de 40 livres d'acier, il est indubitable que les longues épées des Gaulois étaient en fer, puisqu'elles pliaient sous les coups et qu'il fallait les redresser avec le pied. C'est que le four catalan, dont le dernier modèle s'éteignit à Arles-sur-Tech en 1921, procurait normalement le fer, et très irrégulièrement l'acier, qui au seizième siècle provenait surtout de Bilbao et de Catalayud. Cependant l'acier de Damas était renommé, quand en Europe se développa, vers 1630, l'acier de cémentation, obtenu en chauffant du fer en barres sur un lit de charbon au rouge vif. Ce fut le début de l'industrie de l'acier.

Au commencement du dix-huitième siècle, le savant français Réaumur démontra que ce métal doit ses propriétés à la petite quantité de carbone qu'il contient. Partant de cette composition intermédiaire entre celle du fer et celle de la fonte, il transforma celle-ci en acier par chauffage dans de l'oxyde de fer (safran de Mars). En montrant la possibilité de changer la fonte en acier par addition de fer métallique ou oxydé, Réaumur ouvrit la voie : 1^o à Huntzmann, qui obtint, en 1740, le premier acier fondu, 2^o à Karsten, qui réalisa au dix-neuvième siècle le puddlage de la fonte, et 3^o à la fabrication de l'acier Martin. Disposant des hautes températures données par la houille, Karsten plaçait la fonte non plus dans le foyer, mais sur une sole chauffée. Il évitait ainsi l'action sur le métal du soufre contenu dans la houille, et il enlevait l'excès de carbone par addition d'oxyde. Même sous cette forme, le puddlage restait trop onéreux, et ne donnait guère que l'acier nécessaire à la fabrication de pièces de choix. Alors, assez brusquement, un procédé nouveau vint remplacer presque totalement le fer par l'acier.

Bessemer était un Anglais peu versé dans la métallurgie, qui cherchait à stabi-

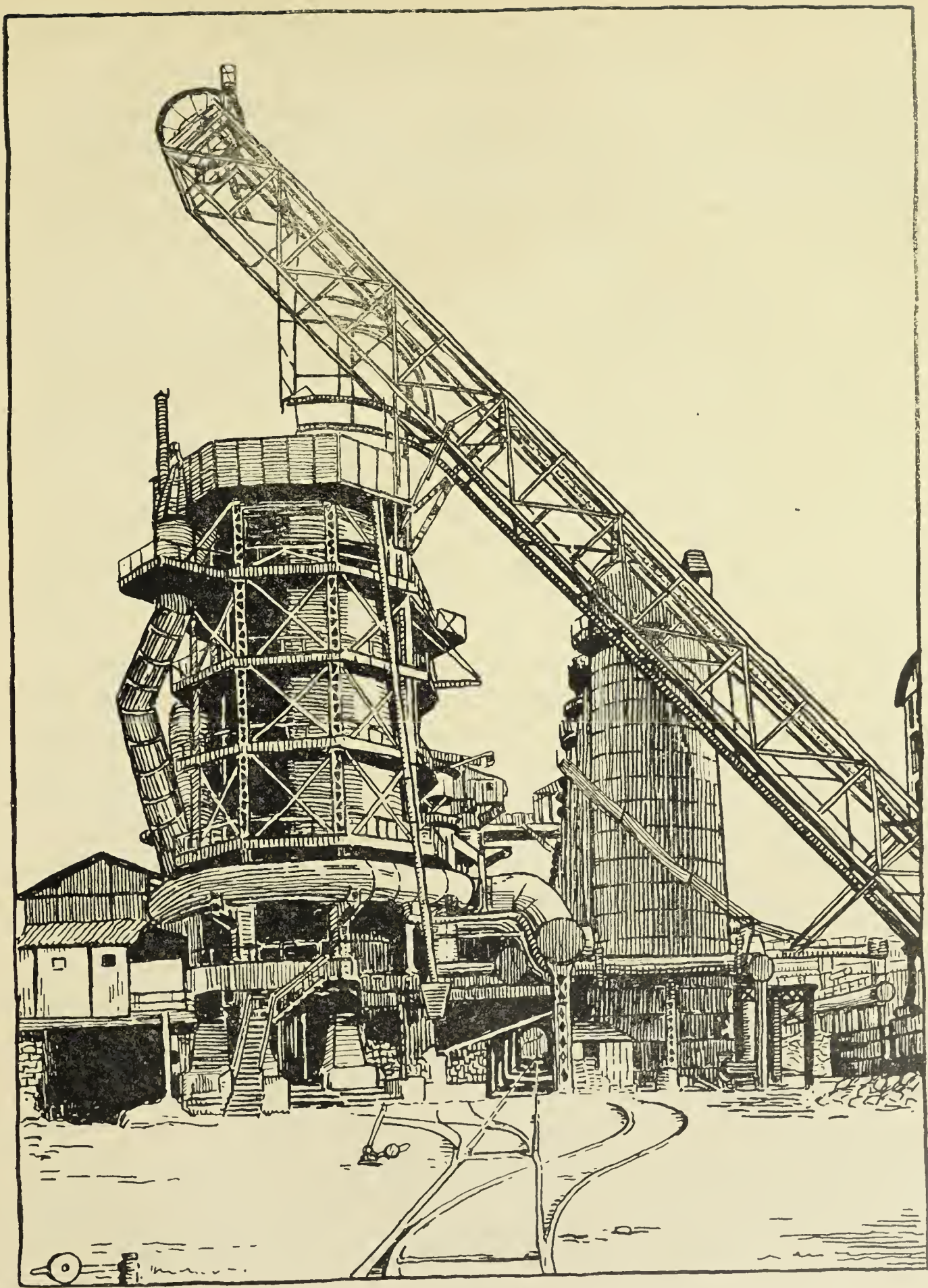
liser la trajectoire des projectiles afin d'accroître la portée des canons. L'usure rapide des pièces en bronze le conduisit à la recherche d'un métal plus dur que le



DERNIER FOUR CATALAN AVEC SON PILON, ÉTEINT EN 1921
A ARLES-SUR-TECH

bronze. Il parvint au but par la réalisation d'une idée très originale, consignée dans son brevet de 1855 : la transformation de la fonte en fer et en acier par l'action d'un courant d'air traversant la fonte en fusion. Soutenu par Napoléon III, qui lui ouvrit les ateliers de l'État, Bessemer établit son premier convertisseur à Saint-Seurin (Dordogne) en 1859 ; il n'obtint qu'un métal brûlé. L'amélioration obtenue avec la fonte suédoise fut attribuée par Mushet à la présence du manganèse, et de fait, par addition de fonte manganésée (*spiegeleisen*) au métal obtenu par le soufflage, il réduisit l'oxyde qu'il contenait, et dès 1865 paracheva le procédé Bessemer. Vingt mi-

nutes suffisant pour changer la fonte en acier, l'expansion en fut si rapide qu'en 1870 tous les canons de l'armée prussienne étaient en acier. Presque en même temps, deux novateurs, Émile et Pierre Martin, rendaient industrielle la fabrication de l'acier sur sole siliceuse (acide) en appliquant à leur four le procédé de chauff-



FONDERIE DE PONT-A-MOUSSON. — LE PLUS PUISSANT HAUT FOURNEAU EXISTANT EN 1914
(DÉTÉRIORÉ PAR LES ALLEMANDS).

fage par récupération de chaleur. Les dépenses de combustible et de main-d'œuvre, plus élevées que dans le procédé Bessemer, sont compensées par la qualité du métal obtenu. En 1865, à Ruffec, P. Martin parvint à mettre son procédé au point. Il n'en tira d'ailleurs aucun profit personnel et mourut dans la gêne, après avoir donné le moyen de faire les aciers durs nécessaires au canon de 75 mm., aux boucliers et aux cuirasses usités dans toutes les marines.

Les procédés Bessemer et Martin résolvaient le problème de la transformation en acier des fontes exemptes de phosphore, mais ne se prêtaient pas à l'élimination de ce corps néfaste au fer et aux aciers. La pratique du puddlage avait démontré la possibilité d'éliminer une partie du phosphore contenu dans la fonte en garnissant les fours par du calcaire mêlé d'oxyde de fer. Ce mélange étant trop fusible pour servir de revêtement au convertisseur Bessemer, l'industrie céramique dut venir en aide à la métallurgie. En 1869, E. Muller, professeur à l'École centrale, montra la voie à suivre en faisant breveter un garnissage du convertisseur Bessemer au moyen de la magnésie, et installa une fabrication de briques en dolomie agglomérée à l'aide d'un peu d'argile, mélange que Gruner avait proposé pour la confection des soles basiques.

Frémy avait signalé l'importance de la déphosphoration, quand Thomas et Gilchrist, appliquant les idées de Muller et de Gruner, obtinrent, en 1880, quelques résultats satisfaisants. Mais le métal retiré du convertisseur basique restait irrégulier en raison des difficultés de construction des revêtements. Le nouveau procédé, essayé à Eaton, fut abandonné ; il réussit au contraire au Creusot et dans les usines rhénanes où, pour ménager la garniture intérieure de briques dolomitiques, on ajoutait à chaque opération une quantité de chaux égale à 20 pour 100 du poids de la fonte. L'élimination du silicium, du manganèse et du carbone contenus dans la fonte se faisait dans le procédé basique comme dans le Bessemer acide. Après l'oxydation complète de ces trois corps, commençait celle du phosphore à l'état de phosphate tétrabasique de chaux, constituant essentiel des scories de déphosphoration si appréciées des agriculteurs. D'où la mise en valeur du gisement du Nord-Est de la France, le plus important qui soit actuellement connu et dont la convoiise par les Allemands fut une des causes inavouées de la guerre de 1914-1918.

Si le convertisseur basique transforme économiquement en acier ordinaire pour rails, profilés, rivets, etc., les minerais phosphoreux, il ne donne pas de produits de choix. Pour déphosphorer au four Martin, on dut éviter la fusion des briques basiques au contact de la voûte siliceuse et résistante du four. De nouveau, la céramique résolut la difficulté, ce qui montre son étroit lien avec la sidérurgie.

Ces opérations sont impressionnantes. Voici la description de ce spectacle grandiose, passionnant, par M. Gabriel Hanotaux dans *l'Energie française* :

« La fonte bout. On ouvre la porte. Le flot d'or s'échappe brusquement et de son éclat soudain illumine tout l'atelier. Il coule, canalisé et dompté, jetant autour de lui une pluie de feu et d'étincelles blanches, bleues, mauves, or et argent, qui semblent des fleurs : des boutons d'or, des marguerites, des myosotis et des roses.

« Plus effrayante encore et plus belle l'admirable épreuve du four Bessemer... la cornue de fer, remplie jusqu'à la gueule et traversée de part en part par un courant d'air d'une violence inouïe, est comme un dragon crachant avec fureur contre le ciel une flamme claire et aveuglante... C'est un tourbillon d'étincelles auprès duquel le bouquet le plus brillant du plus brillant feu d'artifice n'est qu'une pâle chute de quinquets fumeux. »

Les aciers fins et à haute résistance, tous fabriqués au four Martin, ne contiennent pas exclusivement du charbon et du fer. L'introduction de métaux étrangers leur confère des propriétés inattendues. L'incorporation du manganèse à l'acier, étudiée systématiquement en 1878 à l'usine de Terrenoire, appela l'attention des métallurgistes sur les changements de propriétés de ces aciers complexes. L'addition de nickel dans l'acier modifie le grain, le rend inoxydable et, au taux de 25 pour 100, donne le métal *invar* de M. Guillaume, dont la caractéristique absolument remarquable est l'annulation de son coefficient de dilatabilité ; de sorte que ce métal s'adapte à la fabrication de chronomètres, de règles géodésiques, etc., insensibles aux variations de la température.

L'action du chrome, étudiée à Unieux, augmente la dureté et la résistance à la traction. L'usine du Creusot, par des additions à l'acier de 0,5 pour 100 de chrome et un et demi pour 100 de nickel, parvint, en 1888, à diminuer l'épaisseur des blindages des navires de guerre dans de très fortes proportions. Les propriétés mécaniques des aciers au vanadium, au tungstène, au titane, au molybdène, n'ont pas moins influencé le développement des arts mécaniques. Il reste à dire comment la science est intervenue dans le réglage de ces applications.

MÉTHODES D'INVESTIGATION DE M. OSMOND

Dès 1883, Osmond étudiait au Creusot la constitution physique de l'acier, il publiait, en 1885, aux *Annales des mines* ses recherches sur la théorie cellulaire des propriétés de l'acier, faites en collaboration avec M. Werth, et dont voici les conclusions : dans les fers carburés, le carbone forme deux variétés distinctes : 1^o le carbone réellement combiné au fer, ou cémentite qui domine, dans l'acier recuit, et constitue le

ciment des cellules ; 2° le carbone de trempe libre et disséminé dans les noyaux cellulaires. Ces corps sont visibles au microscope après attaque par les acides de sections polies. La trempe et l'écrouissage font subir aux propriétés physiques des aciers des modifications analogues, mais non identiques comme le croyait Caron. En s'appuyant sur les modifications thermiques qui accompagnent les changements moléculaires et en sont le meilleur signe, les savants ingénieurs constatèrent en outre l'existence de fers allotropiques provoquée par la trempe et l'écrouissage, et décelée par la différence des quantités de chaleur que dégage la dissolution dans un acide d'un même acier recuit, trempé ou écroui.

L'allotropie du fer a été étendue au manganèse par M. Guntz, à l'or par M. Hanriot, à l'étain par M. Cohen, et aux catalyseurs par MM. Sabatier et Senderens, après que MM. Osmond, Werth et Howe (1896) eurent montré que le fer ordinaire ou fer α , caractérisé par sa densité (Réaumur), par son coefficient de dilatation (Lavoisier et Laplace) et par son pouvoir magnétique, change brusquement de propriétés à partir de 800 degrés. Les divers états allotropiques β et γ ainsi produits sont instables dans le fer pur, mais fixés par l'aciération, et variables avec la trempe ; ils sont accusés, on l'a vu, par des mesures thermochimiques et des diminutions de malléabilité, de densité et de magnétisme. Par exemple, des barreaux de fer ordinaire, chauffés vers 900 degrés entre des lits de charbon, formeront l'acier de cémentation par dissolution du carbone dans le fer, ou par refroidissement lent ; il se retrouvera à l'état de cémentite Fe^3C à côté de fers allotropiques α , β et γ . L'explication de la trempe ressort immédiatement de ces faits. Prenons notre barreau d'acier chauffé à 900 degrés et refroidissons-le brusquement ; il est d'autant plus dur et moins magnétique que le refroidissement a été plus brusque, parce qu'il renferme moins de fer α , plus de fers allotropiques β et γ et, corrélativement, la quantité de « carbone combiné » est moindre ; elle est passée à l'état de perlite et de graphite (carbone de trempe, propre aux aciers durs). De plus, l'acier dur ne prend plus la trempe au-dessous de 650 degrés. Mais ce point critique observé par Tchernoff s'élève à 750 degrés pour les aciers doux à 0,2 pour 100 de carbone. C'est que la cémentite Fe^3C , qui caractérise les aciers doux, commence à se dissocier à ces températures, en même temps que le fer α se transforme par élévation de la température en fer β , puis en fer γ plus dur encore et non magnétique : le refroidissement brusque, la trempe, maintient la décomposition du carbure et les états allotropiques β et γ , donnant un acier dur, cassant, grenu, plus résistant que l'acier recuit ou lentement refroidi. Naturellement les effets de la trempe changent avec la température du métal et celle du bain.



UNE COULÉE D'ACIER A L'USINE DU CREUSOT
(Établissements Schneider et Cie)

Les différents constituants de l'acier apparaissent facilement sous le microscope (Martens). Il suffit de polir une plaque de métal, puis de l'attaquer par un acide très faible pour observer sa structure cellulaire. Afin de suivre les modifications d'un métal en cours de fabrication, voici la remarquable méthode imaginée par nos officiers d'artillerie : on polit des plaques d'acier dont la teneur en carbone s'élève progressivement : 0,2 ; 0,3 ; 0,35 ; 0,4 ; etc. ; puis, après l'action du corrosif, on photographie les images de chacune de ces plaques qui indiquent leur constitution actuelle. On répète exactement ces opérations sur les mêmes échantillons trempés. A ces images caractéristiques d'aciers parfaitement déterminés, on compare les pièces en cours de fabrication pour en fixer les qualités et la composition. Naturellement cette méthode n'empêche pas le contrôle par des essais de résistance à la traction, auxquels on ajoute maintenant la résistance au choc. Celle-ci, qui mesure la fragilité par le choc, fut mise au point par M. Charpy. Elle fournit des renseignements rapides et très exacts, grâce au mouton-pendule qu'il a imaginé et qui est adopté partout. On a vu que la trempe augmente la résistance et la dureté du métal au détriment de son élasticité. Dans le blindage des cuirassés, la dureté est une qualité, mais aussi l'élasticité qui empêche la fragmentation par le choc. Pour utiliser sur une même plaque ces deux conditions, on cimente la face antérieure par addition de carbone. Par là, on abaisse sa température de trempe, de sorte que si l'on chauffe cette plaque à une température intermédiaire et qu'on fasse intervenir un refroidissement brusque, la partie antérieure cimentée prendra seule la trempe et durcira, tandis que l'autre face, ne pouvant prendre la trempe, conservera son élasticité. Tel est le procédé de M. Charpy dont ces études font un continuateur d'Osmond.

FONTE ACIÉRÉE. Parmi tant d'applications de ces théories, arrêtons-nous aux adaptations des fontes aciérées à la défense nationale. Ces mélanges de fonte et d'acier, connus depuis très longtemps, donnaient encore des mécomptes inexpliqués, quand le capitaine d'artillerie L. Prache en rechercha méthodiquement les causes en 1907. Après s'être assuré par l'analyse chimique que, dans tous les produits satisfaisants, la somme du carbone total et du silicium est voisine de 4,4 pour 100, M. Prache constata que dans les produits irréprochables la teneur en carbone total ne dépasse pas 3 pour 100, dont le quart seulement est combiné, et le reste à l'état graphitoïde. Dans ces conditions, la résistance à la traction dépasse 30 kilogrammes et la résistance à la compression est toujours supérieure à 100 kilogrammes par millimètre carré. Ce métal pouvait alors remplacer l'acier à obus comme résistance et fragmentation.

C'était de plus une fonte peu carburée qui, coulée à haute température, se travaillait par moulage. L'importance de ces recherches, classées dans les cartons du ministère, n'apparut qu'après la bataille de la Marne. La dépense d'obus ayant dépassé les prévisions et la reconstitution des stocks étant trop lente par les moyens mécaniques nécessaires au travail de l'acier dur, le moulage s'imposait. M. Prache, qui était au front, fut rappelé sur les instances du général Sainte-Claire Deville et mis à la disposition du général Gossot, au service de l'armement, où il organisa la technique du procédé. Après avoir réglé les effets du refroidissement sur la composition des produits et sur le déplacement du carbone par le silicium, il prouva, contrairement à l'opinion des fondeurs, que les fontes chargées de silicium présentent une forte résistance pourvu qu'elles soient pauvres en carbone combiné. En même temps, sous l'impulsion du général Camon, des officiers compétents formés par l'inventeur allaient initier les techniciens et propager le procédé, si bien que dès la fin du mois de mars 1915 toutes nos pièces de 95 et d'un calibre supérieur étaient exclusivement alimentées en projectiles fondus, et qu'en 1918 la moitié des obus français étaient en fonte aciérée, ainsi que les livraisons faites à nos alliés. A ces résultats, qui se passent de commentaires, ajoutons que la fonte aciérée se prête à de nombreuses applications industrielles, surtout quand on y ajoute du nickel, conformément aux indications données par M. Prache en 1908 et renouvelées depuis avec un désintéressement absolu.

II

LA MÉTALLURGIE DU CUIVRE

LE CUIVRE Le cuivre est un des métaux les plus anciennement usités. Il se rencontre dans la nature sous les états les plus variés : cuivre natif au lac Supérieur, sous-sulfure ou chalcosine au Montana et au Congo, sous-oxyde au Chili et en Bolivie, chlorure au Pérou, alors que les gisements andalous et mexicains sont principalement constitués par la chalcoppyrite (chalcosine associée à de la pyrite de fer). C'est sur les minerais sulfurés que la science française a exercé son action. Leur traitement par voie sèche repose sur un grillage incomplet à température suffisante qui donne une matte fusible composée des métaux lourds, et une scorie peu dense et non miscible. Ces deux liquides se séparent facilement ; mais la rapide corrosion du revêtement réfractaire du four

à cuve par les scories ferrugineuses a fait remplacer cet appareil par le « water-jacket », mis au point aux États-Unis à partir de 1890.

Dans ce dispositif, le creuset, constitué par des panneaux de tôle à double enveloppe, avec, pour chacun d'eux, une circulation d'eau indépendante, n'a besoin de revêtement que dans le fond du four. La scorie solidifiée sur la paroi de tôle refroidie s'oppose à l'attaque de celle-ci, et en l'isolant limite la déperdition de la chaleur. Certains waterjackets actuels laissent passer, en vingt-quatre heures, deux cents tonnes de minerai. Comme tout autre four à cuve, ils se prêtent mal à la transformation en cuivre des mattes riches.

La réalisation de cette opération finale essentielle est l'œuvre de deux Français. En appliquant le principe du convertisseur Bessemer à l'oxydation des mattes et à leur transformation en cuivre, dès 1880 MM. Manhès et David atteignirent ce but. Ils construisirent leur premier appareil pratique en plaçant l'entrée d'air comprimé, non au fond du convertisseur, mais au niveau le plus élevé atteint par le cuivre après sa séparation de la matte.

Puis des perfectionnements successifs, tels que le sélecteur destiné à séparer du cuivre les métaux précieux qu'il renferme, avaient assuré l'emploi presque universel de ce procédé, quand l'élévation excessive du prix du charbon a ramené aux traitements par voie humide.

Tout récemment les chimistes suédois ont mis au point de grands fours mécaniques étudiés spécialement en vue du grillage chlorurant. Ces appareils reçoivent l'air chaud provenant d'un petit four spécial, et leur grand volume assure un réglage exact de la température au voisinage de 440 degrés.

La solubilisation par grillage chlorurant, devenue moins coûteuse que la méthode par voie sèche, se généralisera jusqu'au retour du bas prix du charbon. En résumé, la crise industrielle née de la guerre, en augmentant le prix des combustibles sans accroître celui du cuivre, a déterminé, en France, le remplacement partiel de ce métal par l'aluminium, et à l'étranger une nouvelle orientation de la métallurgie dont la chimie a tracé la voie.



CHAPITRE VI

LA CHIMIE DES CORPS RADIOACTIFS

Matière radiante. — Expériences de H. Becquerel. — Radium; extraction et propriétés. — L'émanation et ses propriétés. — Similitude des rayonnements de l'ampoule de Crookes et du radium. — Constatations de M. Rutherford et l'unité de la matière. — Nombres atomiques, isotopie. — Conclusion.

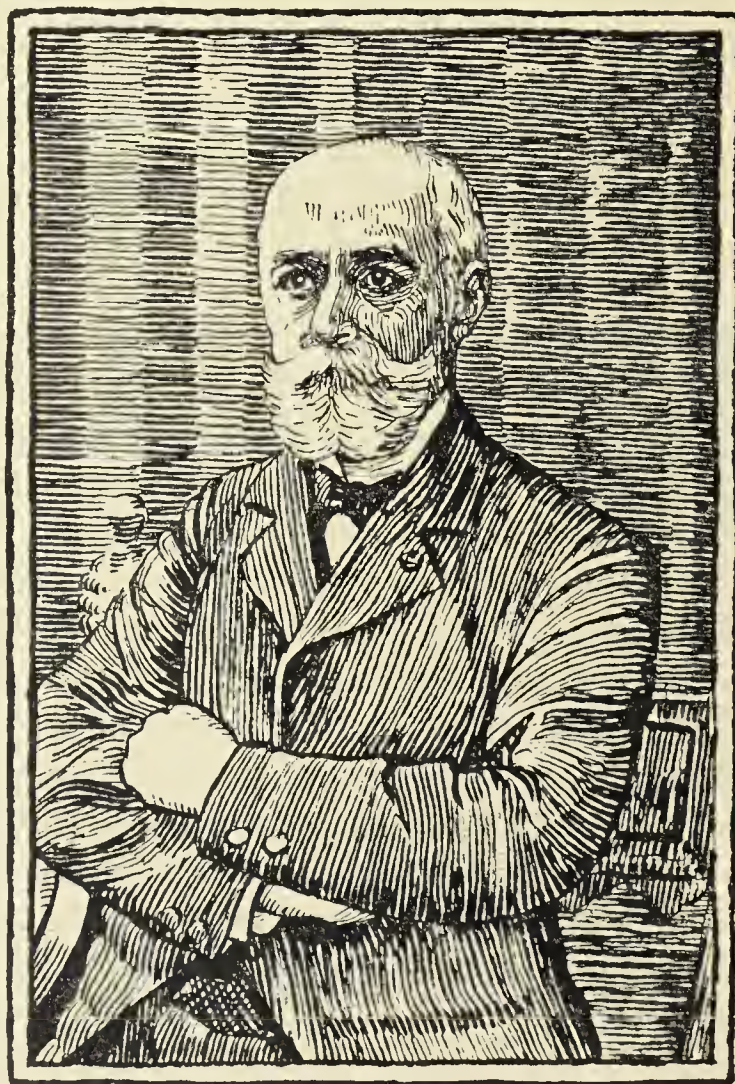


Dès 1809, H. Davy envisageait la possibilité de réduire le nombre des éléments à deux ou trois espèces de matière pondérable, combinées en quantités différentes. Il se servait de l'expression *matière radiante*, que Faraday a ensuite considérée comme un quatrième état de la matière, consistant en « corpuscules ultra-atomiques infiniment ténus, bien moindres et plus légers que les atomes, et qui sont comme la base même des atomes. Sur ces idées, J.-J. Thomson fonda, en 1881, la théorie électro-dynamique et il émit l'hypothèse que les atomes des éléments chimiques dérivent tous d'une même matière, et n'ont pas une existence éternelle. La découverte du radium, quoique issue d'autres considérations, vint apporter un appui à ces hypothèses. Indiquons l'évolution de cette dernière découverte.

L'ampoule de Crookes a donné le premier moyen de réaliser une matière extrêmement diluée, dont les propriétés sont celles de la *matière radiante*. Sans insister sur les beaux résultats trouvés par Sir W. Crookes lui-même, il faut rappeler que le professeur Röntgen a établi, à l'aide de ce merveilleux appareil, l'existence des rayons X. Ce résultat oblige un chimiste à ne pas laisser dans l'ombre le rôle que les platinocyanures ont joué dans cette belle découverte. Ce sont ces sels qui, illuminés

par les radiations invisibles émanées de la partie fluorescente de l'ampoule de Crookes, ont révélé aux yeux l'existence des rayons X et permis de jeter les fondements de la radiographie.

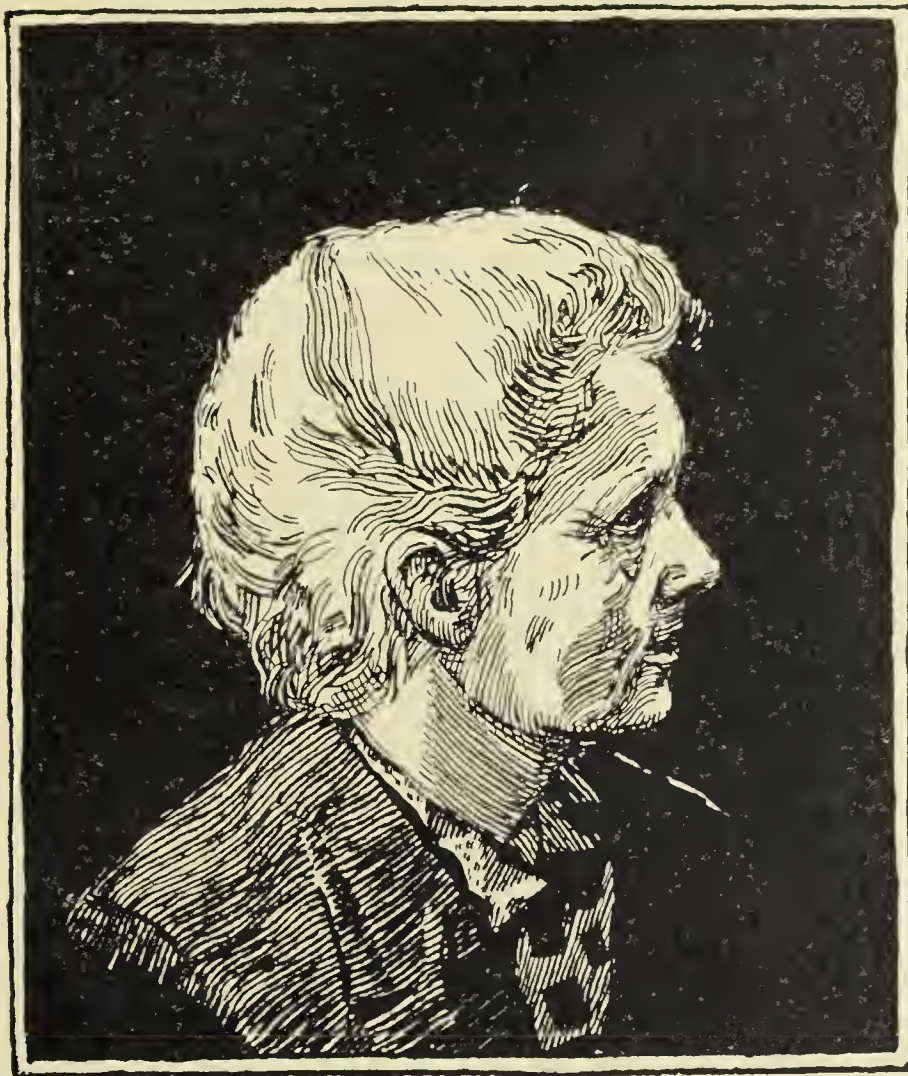
HENRI BECQUEREL De la discussion de ce phénomène lumineux, Henri Poincaré ayant conclu qu'inversement toute substance fluorescente doit émettre des rayons Röntgen, Henri Becquerel tenta l'expérience en partant du sulfate double d'uranium et de potassium, et réussit en 1896 à reproduire les phénomènes décrits par Röntgen. Ayant d'abord placé sur une plaque photographique enveloppée de papier noir ce composé d'uranium rendu phosphorescent à la suite d'une exposition solaire, Henri Becquerel constata que la plaque était impressionnée, tandis qu'elle ne l'eût pas été par des rayons solaires. Il s'aperçut encore qu'une préparation phosphorescente d'uranium, abandonnée depuis longtemps dans l'obscurité d'un tiroir, impressionnait la plaque photographique en dehors de toute action lumineuse. Multipliant ses expériences, il établit que la phosphorescence, pas plus que la lumière solaire, n'intervient dans l'altération de la plaque photographique. D'autre part, l'uranium obtenu par le procédé électrique de Moissan produisant les mêmes effets que ses composés, et ceux-ci étant d'autant plus actifs qu'ils contiennent plus d'uranium, Becquerel en conclut que la radioactivité est une propriété spécifique de cet élément. Elle est donc caractérisée par ce fait extraordinaire qu'au lieu d'être due à des causes mécaniques, lumineuses ou électriques comme dans le cas des ampoules de Crookes,



HENRI BECQUEREL (1852-1908)

elle est spontanément produite par certains corps sans incitation extérieure. Becquerel démontra encore que les composés de l'uranium provoquent la phosphorescence ou la fluorescence de certaines substances placées dans leur voisinage, et qu'ils font perdre le pouvoir isolant de l'air et des autres gaz en les rendant conducteurs de l'électricité.

L'électroscope procura dès lors le moyen de plus simple et le plus sensible de rechercher la radioactivité.



MADAME CURIE

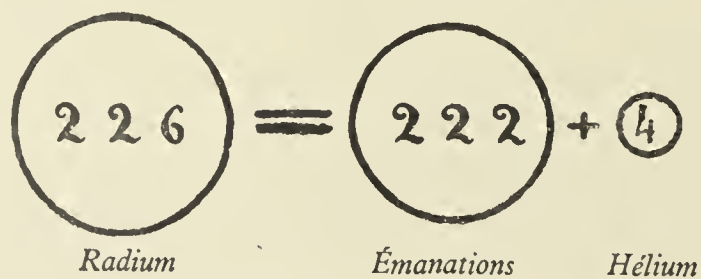
LE RADIUM En 1898, Mme Curie et Schmidt, chacun de son côté, observèrent la radioactivité du thorium. D'autre part, Mme Curie sachant que la pechblende était plus active que l'uranium et le thorium, en conclut que ce minéral devait renfermer d'autres corps radioactifs. Dans le but de les isoler, M. et Mme Curie ont attaqué les résidus de la pechblende par le carbonate de soude ; ils ont obtenu

un résidu inactif et un mélange de carbonates insolubles radioactifs. Ce dernier fut divisé en trois portions par les opérations successives suivantes : 1^o dissous dans l'acide chlorhydrique concentré, il fournit, par addition d'acide sulfurique, des sulfates insolubles contenant le radium et quarante fois plus actifs que l'uranium ; 2^o la liqueur sulfurique précipitée par l'hydrogène sulfuré donna d'autres produits radioactifs, où Mme Curie et M. Bémont trouvèrent le polonium ; 3^o enfin les eaux mères qui ont déposé le polonium abandonnèrent, sous l'action de l'ammoniaque,

des oxydes radioactifs dont M. Debierne a retiré l'actinium (1899-1900). Voici sommairement le traitement de la première portion : les sulfates insolubles furent transformés en chlorures par les méthodes habituelles ; plus de mille cristallisations successives avec l'emploi de l'électroscope aboutirent enfin à l'isolement de 0 gr., 12 de chlorure de radium, pour une tonne de résidus de pechblende.

Mme Curie a déterminé le poids atomique 226 du radium et montré que son activité est un million de fois supérieure à celle de son minerai. Son spectre propre a été étudié par M. Demarçay (1898-1900), et sa redoutable action sur l'organisme constatée par H. Becquerel. Curie et Laborde ayant remarqué que le radium ne cesse d'engendrer de la chaleur, la radioactivité apparut comme caractérisée par ce fait qu'elle est une émission spontanée et continue d'énergie. Ainsi, en peu de temps, les savants français enrichissaient la science d'une série de faits qui, de toutes parts, suggérèrent les recherches les plus variées et amenèrent l'école anglaise à un singulier retour aux idées de transmutation.

ÉMANATION Les premières observations sur ce sujet sont encore dues à M. et Mme Curie. Dès 1899, ils découvrirent le phénomène curieux de l'activité induite en constatant que toute substance demeurée quelque temps au voisinage d'un sel radifère devient elle-même radioactive. Au début de 1900, M. Rutherford annonçait de son côté que les composés du thorium sont capables de produire l'induction radioactive, et pour interpréter les faits, il admit que les corps radioactifs dégagent une émanation assimilable à un gaz et susceptible de transporter la radioactivité. D'autre part, MM. Ramsay et Soddy, après avoir observé que les propriétés physiques de l'émanation ne diffèrent pas de celles des gaz, reconnurent qu'elle perd sa luminosité au bout de cinq jours en se réduisant à rien (C. R. 1905). Si on chauffe le tube capillaire qui la renfermait, il se dégage un gaz dont le volume est environ le quadruple de celui de l'émanation et qui possède le spectre complet de l'hélium, comme si le produit condensé avait émis ce gaz. La désintégration du radium est, d'après les poids atomiques figurée de la façon suivante par Soddy (*Le Radium*, fig. 25).



D'autre part, la désintégration de l'émanation, monoatomique comme l'hélium, conduit à cette conclusion que le résidu solide du dégagement de l'hélium a pour poids atomique 206 ; car $222 - 4 \times 4 = 206$, en supposant qu'aucun doute ne subsiste sur le poids atomique 222 de l'émanation ; car si Perkins, par diffusion d'un volume d'émanation de la grosseur d'une tête d'épingle, a trouvé environ 222, les expériences de Curie et Danne donnaient un nombre très inférieur. Comme 206 est le poids atomique du plomb et que les minerais radifères contiennent du plomb, l'école anglaise admit que ce métal usuel est le terme ultime de cette désagrégation de l'émanation, donc du radium, après passage par des états intermédiaires (Radium A, Radium B, Radium C,...) ; donc aussi de l'uranium considéré comme générateur du radium.

L'énergie de l'émanation du radium équivalant, d'après Ramsay et Cameron, à une énergie trois millions de fois supérieure à celle d'un égal volume de gaz tonnant, on tenta de l'employer à la désintégration atomique, en se conformant aux indications du tableau de Mendéléieff. Ramsay voulait expliquer ainsi le dégagement spontané de l'hélium par le radium, et la présence de l'excès d'hydrogène résultant du dédoublement de l'eau par le radium. Mais la tentative qu'il fit avec M. Cameron, sur une dissolution de sulfate cuivrique, pour en transmuter le cuivre en métaux alcalins par quelques millimètres cubes d'émanation, n'a pas donné les mêmes résultats quand Mme Curie et Mlle Gleditsch l'ont recommencée en substituant des vases en platine aux ampoules de verre des savants anglais.

SIMILITUDE DES RAYONNEMENTS Le parallélisme est complet entre les rayons émis par les corps radio-actifs et ceux qui résultent de l'action de l'électricité dans l'ampoule de Crookes. Dans les deux cas on constate la présence de particules β et γ dont la nature semble indépendante de la cathode et du corps soumis au flux cathodique. Les premières ont une masse 1 850 fois plus petite que celle de l'atome H d'hydrogène et transportent une charge invariable d'électricité négative : celle de l'ion électrolytique. On assimile cette masse à l'atome d'électricité négative (électrons ou particules β). D'autre part on relève l'existence d'autres particules portant deux charges positives dont la vitesse est de 20 000 kilomètres par seconde, et l'énergie cinétique égale à 400 000 000 de fois celle de l'hélium libre : ce sont les particules α sous le choc desquelles scintille un écran de sulfure de zinc (spintariscopes). On peut alors compter les chocs ou les particules α en confondant par une hypothèse ingénieuse le nombre des scintillations avec celui des chocs de ces particules.

MM. Rutherford et Royds ont d'ailleurs montré que le support de cette double charge positive de la particule α est l'atome d'hélium $\text{He} = 4$; car ces particules actives traversent un tube de verre très mince, qui reste imperméable aux gaz normaux, comme le prouvent les scintillations du spinthariscopes de Crookes. Si, à l'intérieur d'une jauge de Mac Leod où l'on a fait le vide parfait, on place le tube mince rempli d'émanation de radium purifiée, celle-ci au bout de quatre jours est à moitié détruite, et l'on constate, en laissant rentrer le mercure dans la jauge, l'existence d'un résidu qui présente le spectre de l'hélium résultant des particules α émises par l'émanation disparue et par ses produits de transformation directe (radium A et radium C). Rapprochons cette belle expérience de celle de Ramsay et Soddy, où l'émanation se réduit à rien parce que les particules α , en pénétrant dans le verre épais, perdent leur énergie cinétique et leur double charge ($++$), en même temps que l'hélium résultant se dissout dans le verre. La chaleur l'en sépare comme le ferait sans doute la dissolution du verre, puisque Ramsay a découvert ce gaz en dissolvant la clévite dans les acides, et puisque c'est vraisemblablement par une désagrégation analogue qu'il se trouve dans certaines eaux minérales où M. Moureu l'a découvert en si grande abondance et exempt de particules α .

CONSTATATIONS DE M. RUTHERFORD La particule α constitue à l'état libre la source puissante d'énergie dont M. Rutherford se sert pour désintégrer le noyau atomique. Quand cette particule rencontre l'atome d'azote N, elle le disloque en hélium $\text{He} = 4$ associé dans la proportion $3/2$ avec la particule $\text{H} = 1$ d'hydrogène, alors que, dans la désintégration d'autres éléments, on rencontre des particules de poids 3 que ce savant suppose être de l'hélium isotope. Voici des exemples de ces désintégrations obtenues sous l'action destructive de la particule α . Les résultats rappellent les rapprochements suggérés à Dumas par la remarque de Prout, mais où les analogies chimiques étaient respectées comme elles l'ont été aussi par Mendéléïeff pour établir sa classification :

<i>Azote</i>	$\text{N} = 14 = 3 \times 4 + 2$,	<i>d'après la numération des particules.</i>	
<i>Bore</i>	$\text{B} = 11 = 2 \times 4 + 3$,	—	—
<i>Fluor</i>	$\text{F} = 19 = 4 \times 4 + 3$,	—	—
<i>Sodium</i>	$\text{Na} = 23 = 5 \times 4 + 3$,	—	—
<i>Aluminium</i>	$\text{Al} = 27 = 6 \times 4 + 3$,	—	—

Les partisans de l'unité de la matière s'efforcent aussi de prouver l'existence de la particule $\text{H} = 1$ d'hydrogène conforme à l'hypothèse de Prout. Les partisans de son origine électromagnétique vont plus loin : ils assimilent la particule H, plus

petite que l'électron, à l'atome d'électricité positive ; mais des atomes d'électricité positifs et négatifs sans support matériel, neutralisés l'un par l'autre pour former un élément ou plutôt une molécule électriquement neutre, s'évanouiraient en perdant leur qualité essentielle, leur charge électrique égale et contraire. Non seulement la matière ne serait pas éternelle comme le pense J. J. Thomson, mais son existence serait inconcevable ou à la merci de l'expérience.

En persistant à confondre la matière et les sources d'énergie issues de ses transformations, on retombe dans le chaos alchimique. Certains physiciens en conviennent et le proclament, tout en admettant que la particule α possède le même poids que l'atome d'hélium, et n'en diffère que par une charge électrique et une énergie cinétique absorbées par le verre, comme l'établit l'expérience de Ramsay, confirmée par celle de Rutherford. A cette absorption d'énergie répondent des actions chimiques que le verre accuse par des changements de couleur plus apparents que les désintégrations produites par le choc des particules α sur les atomes du récipient ou sur ceux des gaz occlus.

D'après Rutherford, l'identité des particules H d'hydrogène extraites de l'atome d'azote, n'est pas douteuse ; mais pour en produire un millimètre cube, il faudrait « utiliser les particules α émises par deux kilogrammes de radium, pendant une année », de sorte qu'avec la quantité de radium 0,2 gramme mise en œuvre par ce savant, 10 000 années seraient nécessaires pour atteindre ce résultat dont l'admirable précision ne semble cependant pas devoir annuler la chimie, qui procède d'actions plus rapides et d'autres conditions.

NOMBRES ATOMIQUES Toutefois, il est incontestable que la radioactivité a suggéré de nouvelles conceptions : d'abord celle de noyaux atomiques constituant la partie fondamentale des éléments et caractérisée par une charge électrique positive dont les électrons négatifs sont les satellites. Puisque les éléments sont électriquement neutres, la charge positive du noyau est égale au nombre des électrons périphériques de Mme Curie, électrons qui entourent et neutralisent le noyau positif. Ce nombre, nécessairement entier comme celui des électrons, se confond avec le nombre atomique de Van Den Broek, qui marque le rang de l'élément dans le tableau de Mendéléïeff et varie de 1 à 92. Il limite à 92 l'existence des éléments, depuis l'hydrogène jusqu'à l'uranium, et exclut les éléments stellaires (nébulium et coronium) de MM. Fabry, Buisson et Bourget ; car le poids atomique de ces corps avoisinant 3, leur charge nucléaire ne peut être intercalée entre celle de l'hydrogène qui est 1 et celle de l'hélium $\text{He} = 4$ qui est 2.

Pour tout élément, le spectre de rayons X, envisagé comme plus simple et tout aussi caractéristique que celui des rayons lumineux, fournit à Moseley un moyen empirique de déterminer le nombre atomique. Généralisé par M. de Broglie et par des savants étrangers, ce moyen mit en relief le nombre atomique qui remplace le poids atomique dans la classification de Mendéléïeff, de sorte que celle-ci reste à la fois un critérium et un cadre intangible bien que l'existence de cyanures doubles et de chlorures complexes, $\text{Ag}[\text{CN}]^2.\text{K}$ ou $\text{AuCl}^3.\text{K}$ par exemple, accuse l'opposition des métaux alcalins à l'or et à l'argent constitutifs du groupe électronégatif bien que de la même famille.

I**SOTOPIE** La notion d'isotopie fut indiquée par M. Soddy en 1911. Alors que l'allotropie est une propriété moléculaire qui influe sur les propriétés physiques et chimiques des éléments (oxygène, soufre, phosphore), l'isotopie suppose que ce ne sont ni le poids ni la composition invariables qui caractérisent un élément, mais la charge positive du noyau atomique, autrement dit le nombre atomique. L'ionium $\text{Io} = 230$ de M. Boltwood et le thorium $\text{Th} = 232,2$, ni leurs composés ne peuvent se séparer par des milliers de cristallisations ; leurs spectres sont identiques, parce qu'ils ont une charge nucléaire identique $\mathfrak{N} = 90$: ce sont des isotopes. De même le plomb radifère de poids atomique 206 est identique au plomb des minerais thorifères de poids atomique 208, parce que l'un et l'autre ont le même nombre atomique $\mathfrak{N} = 82$.

Les gaz aussi sont sujets à l'isotopie. M. Aston, par l'étude des spectres de rayons positifs, a constaté que la molécule HCl possède un spectre de lignes dédoublées dont les positions répondent, l'une au poids moléculaire 35, l'autre au poids moléculaire 37. L'unité de la matière et l'existence d'éléments isotopes procèdent d'expériences dont la valeur est incontestable, mais dont les interprétations ne vont pas sans réserves. Précisément parce que l'unité de la matière est une hypothèse séduisante, il faut s'en défier et craindre de déformer l'observation. Ainsi la valeur $\text{He} = 3$ de l'hélium isotope affaiblit les conséquences antérieurement tirées de la désintégration du radium (formule figurée : $\text{Ra} = \text{Em} + \text{He}$, dans laquelle $\text{He} = 4$). De même pour l'hydrogène, la différence entre le poids atomique $\text{H} = 1,008$ et son nombre atomique ou particulière $\text{H} = 1$ appelle l'attention sur une importante constatation de Ramsay déjà citée. Le mélange tonnant obtenu par l'illustre chimiste dans la décomposition de l'eau par les sels de radium renferme un excès d'hydrogène, comme si l'action du métal radio-actif avait, en libérant l'hydrogène, altéré la capacité de combinaison de ce gaz. Il importerait alors de mesurer

le rapport de l'hydrogène rentré en combinaison à l'hydrogène total issu de la décomposition radio-active de l'eau, puis de constater si ce rapport approche de 1 : 1,008, enfin de s'assurer si la vapeur d'eau synthétique est elle-même en rapport avec cette isotopie de l'hydrogène. On aurait ainsi une preuve directe, à la fois analytique et synthétique, d'une isotopie capitale si l'excès d'hydrogène n'est pas due exclusivement à la formation d'eau oxygénée.

EXPÉRIENCES DE LECOQ Il ne serait aucunement superflu d'appuyer les interprétations de questions aussi délicates sur les deux ordres de preuves, analyse et synthèse, qu'exigeait Lavoisier. Pour n'avoir pas observé ces règles, l'illustre Crookes a attribué les spectres de phosphorescence directs ou excités par des rayons β , à la transmutation des éléments en méta-éléments, tandis que Lecoq de Boisbaudran a démontré que ces spectres proviennent de l'addition d'une petite quantité de corps étrangers à la matière phosphorescente, si bien que la luminosité disparaît parfois sous l'influence de deux impuretés différentes. Il convient toutefois de remarquer que ce fut la constance des résultats obtenus par des méthodes différentes qui conduisit à la conception d'atomes identiques par toutes leurs propriétés sauf leur poids ; mais alors on doit réaliser trois particules de chlore isotopes ; attendu qu'un atome monovalent A donnant naissance à la molécule A-A, son isotope B, jouissant de propriétés identiques, devra fournir indifféremment les molécules B-B et A.-B.

CONCLUSION Historiquement, il n'est pas sans intérêt de remarquer qu'en 1821, alors que la plupart des physiciens envisageaient le calorique comme une substance matérielle, Ampère voyait dans ses courants particuliers une explication des phénomènes de cristallisation. Il lui eût suffi de matérialiser ces courants hypothétiques, qui ont servi de fondement à l'électrodynamique, pour arriver à la conception actuelle de l'atome électronique. Son lumineux génie, qui entrevoyait tant de possibilités échappant aux autres savants, s'en tint à l'hypothèse d'Avogadro, qu'il avait restaurée et propagée en 1814. En évitant de confondre les faits et l'hypothèse, il a laissé intacte la conception de Lavoisier, c'est-à-dire l'idée d'une matière pesante constituée par des éléments indestructibles, qui a fait de la chimie une science dont l'étonnant développement ne s'arrête pas. Au choc ou au changement d'allure de ces particules provoqué par l'action chimique, Lavoisier attribuait une production corrélatrice d'énergie qui se manifeste sous formes de chaleur, de lumière, d'électricité, impondérables. L'impossibilité de séparer la chaleur de l'action chimique apparaît nettement dans son analyse de l'air par le

mercure, et se retrouve dans son Mémoire en collaboration avec Laplace. Les courants continus de Volta ont fait ensuite connaître une autre forme d'énergie, émanée elle aussi de l'action chimique, et dont la puissance, supérieure à celle de la chaleur, fut aussitôt appliquée par Davy à la séparation des métaux alcalins prévus par Lavoisier. Peu après, la merveilleuse découverte de Daguerre et Niépce venait montrer que la lumière, qui accompagne si souvent les actions chimiques, réagit sur elles avec une rapidité et une précision qui ont fait de la photographie le moyen d'investigation le plus subtil que l'on connaisse. Ce fut la photographie qui révéla à H. Becquerel l'existence d'une nouvelle source d'énergie incomparable, mise en évidence par le radium, le polonium et l'actinium, isolés par M. et Mme Curie et leurs élèves. Ce n'est donc pas seulement la chimie sous toutes ses formes qui est sortie des conceptions de Lavoisier, mais aussi la source commune des diverses manifestations impondérables de l'énergie. Actuellement, on prend le contrepied de ces idées en cherchant dans l'énergie électrique l'origine de la matière. Quoique les corps radioactifs, isolés par voie chimique, manifestent par leur désintégration spontanée des effets qui échappent aux lois chimiques et mécaniques admises, on n'est pas en droit d'envisager la substance comme une abstraction et de plier les faits à cette hypothèse. Une telle prétention soulève des contradictions. Ainsi l'hélium et la particule α ont le même poids 4, mais l'énergie cinétique de l'hélium reste conforme à celle des molécules gazeuses, tandis que l'énergie de la particule α lui est incomparablement supérieure ; de plus cette énergie varie avec son origine cathodique ou radioactive, d'après M. Soddy, de sorte que le corps α ne correspondrait plus à l'hélium et changerait même de nature si la matière se confondait avec l'énergie. Quant à la double charge électrique de cette particule α , elle n'a rien de la signification caractéristique qu'elle possède dans les ions bivalents et dans les noyaux atomiques hypothétiques, où elle exprime une affinité pour les ions négatifs. Devant tant d'affirmations qui, peu à peu, ont pris forme de doctrine, il est bon de rappeler qu'il n'est pas indispensable de restaurer l'alchimie ni d'invoquer l'origine électro-magnétique de la matière pour concevoir la possibilité de réduire le nombre des éléments ou pour interpréter la désintégration spontanée des corps radioactifs. Un grand esprit, Duhem, en expliquant cette désintégration par l'hypothèse que le travail de viscosité ou de frottement peut être négatif, « entendait rappeler qu'aucune hypothèse n'est *a priori* inadmissible, et que les faits paraissant le mieux établis sont toujours sujets à révision » (Émile PICARD, *Vie de Duhem*).

Les expériences de Gay-Lussac sur la simplicité des volumes gazeux qui entrent en combinaison ont suggéré à Ampère cette admirable théorie moléculaire, par

laquelle il a relié la chimie de Lavoisier à la cristallographie d'Haüy et aux lois concernant la dilatation des gaz sous l'influence de la détente et de la chaleur. En plaçant les poids atomiques sous la dépendance de la molécule dont M. Perrin a montré la réalité, l'école française envisageait l'atome comme une masse élémentaire dont l'origine expérimentale, en rapport avec les lois et les opérations de la chimie, n'entraîne pas le caractère d'indivisibilité. Admis par Dalton et répudié par Dumas, ni Gay Lussac, ni Chevreul, ni Thénard, ni Pasteur, ni Berthelot, ni Deville, ni Moissan n'ont fait usage de ce caractère.

Au contraire, en conservant l'hypothèse atomique comme nécessaire à la conception des molécules matérielles, on a défini cette particule élémentaire par son poids et on l'a caractérisée par son spectre lumineux. La valeur des poids atomiques, rectifiée par des considérations moléculaires, suggéra la classification de Mendéléïeff dont la périodicité n'est pas exempte d'arbitraire, puis l'hypothèse de l'unité de la matière par suite d'une remarque ingénieuse mais contestable du chimiste français Prout. Pourtant aucun des maîtres précités n'aurait conclu de l'égalité :

$$\text{Radium (226)} = \text{Émanation (222)} + \text{Hélium (4)}$$

que le radium est un corps à inscrire dans le tableau des éléments, non plus que l'émanation et d'autres corps éphémères. Si le radium ne présente aucune raie de l'hélium, c'est que le caractère spectral caractéristique d'un corps pur s'efface dans les mélanges : le spectre de l'azote atmosphérique n'offre aucune raie des argonides qu'il contient. Cette façon d'augmenter le nombre des éléments en remplissant les cases du tableau de Mendéléïeff pour aboutir à quatre-vingt-douze corps primordiaux n'est évidemment pas un argument en faveur de l'unité de la matière ; c'est plutôt une extension remarquable de l'analyse spectrale, parce que les spectres de rayons X sont en rapport avec les nombres atomiques. Au contraire les désintégrations atomiques effectuées par M. Rutherford, sous le choc des particules α semblent faire de l'hélium et de l'hydrogène l'origine des atomes matériels, et conduire ainsi à l'hypothèse de l'unité de la matière. Mais rappelons que, dans l'ampoule de Crookes, tout gaz, quelle qu'en soit la nature, se subdivise en particules α , β et γ , si bien que la particule ultime que l'on poursuit se désagrège, s'évanouit et semble finalement « se dissoudre en métaphysique », suivant la forte expression de M. de Launay ; et nous reconnaitrons le mérite de la chimie française qui a pressenti ces difficultés et s'est gardée de subordonner les faits à toute interprétation prématurée, par conséquent arbitraire.

RÉSULTATS

Ainsi la chimie, en apportant le concours de l'expérience aux plus hautes spéculations philosophiques, nous enseigne invariablement la réserve vis-à-vis des hypothèses même les mieux indiquées : l'étude de la nitrification démontre que la plus simple des transformations chimiques qui concourent à la vie végétale n'a pas, comme on le pensait, une origine physico-chimique ; la radioactivité jette un doute sur l'indivisibilité atomique et oblige à réviser les fondements de la mécanique rationnelle en désaccord avec l'émission continue d'énergie dégagée par les corps radioactifs. A ces résultats inattendus d'une science essentiellement matérielle s'ajoutent ceux qui, non moins surprenants, ont bouleversé la vie journalière et sociale par la simple application des lois pondérales de Lavoisier.

Entre les arts pratiqués à l'époque romaine et ceux qui florissaient sous le règne de Louis XIV, il y avait peu de différence. Le fer restait rare, la porcelaine n'existait qu'en Chine et la vaisselle de Palissy était un luxe royal. A l'imitation des Romains, on usait des pouzzolanes pour améliorer les mortiers et celles qui servirent à l'édification du palais de Versailles provenaient encore d'Auvergne ou de Pouzzoles.

Actuellement la production annuelle mondiale des hauts fourneaux permettrait d'entourer la terre à l'équateur d'un cercle de fer d'un mètre de large et de dix centimètres d'épaisseur ; bien plus, le fer a fait place à l'acier. La production de la chaux est comparable et sans cesse croissante, sans pourtant suffire aux besoins modernes. Les gisements de kaolin de Saint-Yrieix alimentent nos importantes fabriques de porcelaine de Sèvres et de Limoges. L'usine que Colbert avait à grands frais établie à Saint-Gobain pour concurrencer les glaces de Venise, a centuplé et essaimé à Cirey, à Montluçon et, depuis un demi-siècle, en Allemagne même ; tandis que notre cristallerie de Baccarat concurrence à Venise les beaux produits de Murano. Il faut ajouter à ces développements l'extraction de métaux insoupçonnés au dix-huitième siècle, entre autres le chrome de Vauquelin et Moissan, l'aluminium de Deville et Héroult dont l'emploi a transformé l'outillage et l'aviation. Quant à l'industrie chimique, elle était inexistante avant Lavoisier : ni la fabrication des acides, ni celle de la soude artificielle, ni celle des produits chlorés ne se sont développées avant le dix-neuvième siècle. Enfin la chimie agricole a supprimé les famines dévastatrices de l'antiquité et du moyen âge et provoqué une incroyable recrudescence industrielle, car l'agriculture est la plus grande force propulsive de l'industrie. Laissons de côté en effet les nombreuses industries de transformation relevant de l'agriculture, huileries, féculeries, sucreries, distilleries..., pour n'envisager que la question secondaire du transport des nitrates, des phosphates et

des sels potassiques nécessaires au maintien de la fertilité du sol. Chacune de ces matières premières ferait chaque année le chargement complet d'un train continu de Paris à Brindisi suivant le littoral méditerranéen : soupçonne-t-on la répercussion d'un pareil trafic sur la sidérurgie, sur la construction des navires et des locomotives et sur la main-d'œuvre ? Si la France savait organiser et défendre les progrès agricoles indiqués par ses savants, sa prospérité ne le céderait en rien à celle que l'Angleterre doit à l'exploitation des Indes : inhérente à son sol, elle serait même plus solide.

Pour apprécier exactement la portée de la chimie dans l'évolution de la vie moderne, il convient de rappeler dans un autre ordre d'idées la rénovation de la chirurgie par la découverte du chloroforme et par l'adaptation des méthodes pasteurienues ; puis la transformation de la médecine consécutive aux recherches de Pelletier et Caventou suivies de la synthèse des médicaments. Cette reconstitution est une branche des industries organiques qui, surgissant de toutes parts, sont comme la floraison de la découverte de Le Bon. Après avoir modifié les procédés de chauffage et d'éclairage et inspiré les moteurs à explosions, la question du gaz a fait surgir de nouvelles sources de richesses et révolutionné certains arts. Citons la modification de l'industrie textile par la soie Chardonnet et la viscose, celle de la tactique militaire grâce au remplacement de l'ancienne poudre de guerre par les produits inventés par M. Vieille et par M. Turpin, puis l'apparition des gaz toxiques, ironique réalisation de la formule : « guerre à la guerre ».

Tous ces bouleversements si rapides des conditions sociales exigent une réglementation adéquate. Ce sont les facteurs essentiels du progrès moderne auxquels les lois rigides ne s'adaptent plus. La chimie nous enseigne, et c'est un point à signaler, que l'ère des doctrines systématiques est terminée. Aujourd'hui qu'une fabrication impeccable est parfois démodée en dix ans, qu'un procédé nouveau anéantit tout à coup de puissantes sociétés insuffisamment prévoyantes, la vie sociale ne peut être régie par des incompetents, ni par des orateurs verbeux. Pour dominer les conflits résultant d'une incessante mobilité et faciliter l'éclosion de tant de sources de richesses, le législateur moderne, sans être un savant spécialisé, doit du moins connaître la portée des sciences, leurs tendances, leurs points de contact avec la pratique. Ce minimum de philosophie, au vrai sens du mot, atténuerait du moins l'influence néfaste de commissions comme celle que l'illustre chimiste anglais sir W. Ramsay a stigmatisée en 1916 : elle avait omis dans la désignation des contrebandes de guerre le lard et les pyrites, dont les Allemands tiraient la glycérine et l'acide indispensables à la fabrication de la poudre de guerre, etc.

Je ne sais si cette protestation eut l'honneur d'une discussion officielle ; mais la décision des commissaires a sans doute coûté plus de vies qu'une grande bataille historique. A cet exemple, on pourrait joindre celui de la fonte aciérée ; cette fois encore, comme en 1792, la chimie avait assuré les munitions indispensables à la victoire ; et combien cette victoire eût été plus rapide si la fabrication de la fonte aciérée avait commencé dès 1910, année où elle fut réglée ; notre approvisionnement en projectiles eût été doublé sans grande dépense. Peut-être la victoire de la Marne eût-elle pu mettre fin à la guerre.

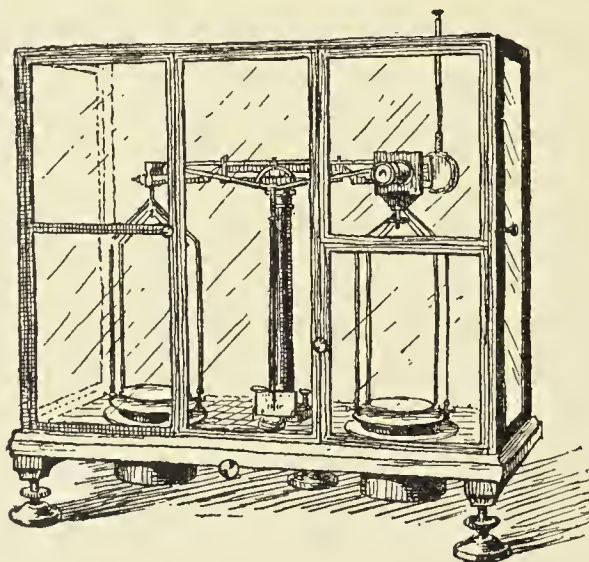




TABLE DES ILLUSTRATIONS

HORS TEXTE EN COULEURS

par B. MESTCHERSKY

	Face aux pages
I. — UN COURS D'ALCUIN A L'ABBAYE DE SAINT-MARTIN A TOURS EN 800.....	16
II. — D'ALEMBERT, d'après le pastel de LA TOUR.....	64
III. — L'OBSERVATOIRE DE PARIS VERS 1680.....	96
IV. — APPLICATION DE LA BOUSSE A LA CONDUITE DES NAVIRES (Nefs françaises vers 1500)...	176
V. — EXPÉRIENCE DE L'ABBÉ NOLLET, d'après une gravure de Sueur.....	240
VI. — LES BALLONS. — ASCENSION DE CHARLES ET ROBERT AUX TUILIERIES (1 ^{er} décembre 1783).	304
VII. — EXPÉRIENCE DU PENDULE DE FOUCAULT AU PANTHÉON (Mars-avril 1851).....	352
VIII. — SERVICE POSTAL PAR AVIONS A L'AÉORODROME DU BOURGET (Avion Farman).....	416
IX. — COULÉE DE GLACE A L'USINE DE CHANTERINE (Compagnie de Saint-Gobain).....	448
X. — CÉRAMIQUE. — PORCELAINES TENDRES DE VINCENNES (1753. Musée de Sèvres).....	464
XI. — DÉCOUVERTE DU GAZ D'ÉCLAIRAGE PAR PHILIPPE LE BON (Expérience de l'hôtel Seignelay).	528
XII. — UNE COULÉE D'ACIER A L'USINE DU CREUSOT (Établissements Schneider et C ^{ie}).....	592

ILLUSTRATIONS EN NOIR

par B. MESTCHERSKY

INTRODUCTION

	Pages.
LAVOISIER, SADI CARNOT ET PASTEUR. — LE TRAVAIL SCIENTIFIQUE EST EN GRANDE PARTIE UN TRAVAIL COLLECTIF.....	I
LES PATRES DE LA CHALDÉE OBSERVANT LES ASTRES.....	II
QUE PERSONNE N'ENTRE ICI S'IL N'EST GÉOMÈTRE (Platon).....	IV
LA MÉDITATION DE PASCAL.....	IX
AMPÈRE ÉTUDIE L'ACTION DES COURANTS SUR LES COURANTS.....	XII
PASTEUR ÉTUDIE LA RAGE.....	XIV
LA TÉLÉGRAPHIE SANS FIL.....	XVI
LA MÉCANIQUE UNIVERSELLE.....	XVII
LA VOCATION SCIENTIFIQUE.....	XIX
CUL-DE-LAMPE.....	XX

HISTOIRE DES SCIENCES EN FRANCE

PREMIÈRE PARTIE

MATHÉMATIQUES, MÉCANIQUE ET ASTRONOMIE

	Pages
FRONTISPICE DE « TABULÆ MOTUUM CÆLESTIUM PERPETUÆ » DE PH. LANSBERG (1632).....	3
ORONCE FINE, d'après une gravure anonyme.....	17
PIERRE RAMUS, d'après une gravure de Van Sichem.....	18
OBSERVATIONS ASTRONOMIQUES DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES, d'après Sébastien Le Clerc.....	23
LE CABINET DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES AU PALAIS DU LOUVRE, d'après Sébastien Le Clerc.....	25
MAUPERTUIS, d'après un tableau de Tournières.....	30
BLAISE PASCAL, d'après une gravure de D. Sornique.....	40
FONTENELLE, d'après un tableau de Voiriot, gravé par Langlois.....	57
CONDORCET, d'après un dessin de J.-B. Lemort, gravé par A. de Saint-Aubin.....	63
ÉTIENNE BEZOUT, d'après une gravure de Chaffard.....	65
L'ABBÉ DE LACAILLE, d'après un portrait de Mlle Le Jeuneux, gravé par Mlle Devaux.....	66
LAGRANGE, d'après une gravure de Robert Hart.....	67
LAPLACE, d'après une lithographie de Boilly.....	71
GASPARD MONGE, d'après une lithographie de Boilly.....	74
LEGENDRE, d'après un dessin de Belliard, lithographié par Delpech.....	77
CUL-DE-LAMPE.....	80
FRONTISPICE DU « TRAITÉ DE LA CONSTRUCTION DES INSTRUMENTS DE MATHÉMATIQUE » (1752)....	81
LE PÈRE MERSENNE, d'après une gravure de Moncornet.....	83
MACHINE RÉCENTE ET NOUVELLE (FAICTE PAR LA BALANCE) A L'AIDE DE LAQUELLE ON DESCHARGE AISÉMENT LES BATEAUX QUI SONT PARVENUS A PORT PLEINS OU D'EAU DOUCE OU D'AUTRES CHOSES MENUES ET MESURABLES, d'après le <i>Theatrum Instrumentorum</i> de Besson (1578).....	88
D'ALEMBERT, d'après un dessin de Massard, gravé par Weber.....	94
ISMAEL BOULLIAUD, d'après un portrait de J. Van Schuppen, gravé par P. Van Schuppen.....	100
LUNETTE, d'après la <i>Mesure de la terre</i> , par l'abbé Picard.....	102
COMPAS, d'après le <i>Theatrum Instrumentorum</i> de Besson.....	103
D'après une figure de la <i>Mesure de la terre</i> , par l'abbé Picard.....	105
J. D. CASSINI, d'après un portrait du temps.....	107
J. DE LALANDE, d'après une gravure de F. Bonneville.....	110
FRONTISPICE DE LA « FIGURE DE LA TERRE » (1738). Voyage de Maupertuis en Laponie.....	114
DÉTAIL DU FRONTISPICE DU « TABULÆ MOTUUM CÆLESTIUM PERPETUÆ » de Lansberg (1632)....	124
LA SCIENCE, fresque de Puvis de Chavannes, frontispice.....	125
CAUCHY.....	132
HENRI POINCARÉ.....	137
LAZARE CARNOT, d'après Boilly.....	144
MICHEL CHASLES.....	145
LE VERRIER, d'après un portrait conservé à l'Observatoire de Paris.....	158
CUL-DE-LAMPE, d'après un cul-de-lampe de la <i>Théorie de la lune</i> , par Clairaut (1765).....	163

DEUXIÈME PARTIE

HISTOIRE DE LA PHYSIQUE

FRONTISPICE, d'après le frontispice du <i>Theatrum Instrumentorum</i> de Besson (1578).....	167
EXPÉRIENCE DU PÈRE MERSENNE, d'après les <i>Nouvelles conjectures sur la pesanteur</i> de Varignon.	173
FABRI DE PEIRESC, d'après un portrait gravé par Béchét.....	177
VISITE DE LOUIS XIV A L'OBSERVATOIRE DE PARIS LE 1 ^{er} MAI 1682, d'après Sébastien Le Clerc.....	179
MACHINE A FEU DE DENIS PAPIN, d'après <i>Nouvelle manière pour lever l'eau par la force du feu</i> ..	190
RENÉ DESCARTES, d'après Franz Hals.....	194
LUNETTE SANS TUBE DE HUYGENS.....	198

TABLE DES ILLUSTRATIONS

	Pages
LA TOUR DE MARLY A L'OBSERVATOIRE, d'après Coquart (<i>Atlas curieux</i> de De Fier, 1706)	200
CHRISTIAN HUYGENS, d'après une gravure de G. Edelinck.....	205
FRONTISPICE du <i>Traité d'optique</i> (1760).....	207
POLÉMOSCOPE, d'après le <i>Traité de physique</i> de l'abbé Nollet.....	210
JEAN RUAUX, <i>émailleur du roi</i> , d'après un dessin d'un officier de la maison du dauphin (1739).	211
MONTRE A LONGITUDE DE BERTHOUD, d'après la <i>Mesure du temps</i>	215
MICROSCOPE DOUBLE DE MARSHAL, d'après le <i>Cours d'optique</i> de Smith, traduit par le père Pezénas.	223
BOUGUER, d'après un tableau de Peronneau, gravé par Miger.....	225
MACHINE ÉLECTRIQUE DE L'ABBÉ NOLLET (d'après l' <i>Essai sur l'électricité des corps</i> , 1746).....	227
J.-A. NOLLET, d'après un portrait de La Tour gravé par Beauvarlet.....	229
L'EXPÉRIENCE DE LEYDE, d'après l' <i>Essai sur l'électricité des corps</i> de l'abbé Nollet, 1746.....	230
EXPÉRIENCE DE LE MONNIER SUR LA VITESSE DE L'ÉLECTRICITÉ.....	231
DÉCHARGES ÉLECTRIQUES DANS L'AIR RARÉFIÉ (1753).....	232
B. FRANKLIN, d'après une gravure de Martinet.....	234
L'EXPÉRIENCE DU CERF-VOLANT PAR DE ROMAS, d'après une gravure du temps.....	235
DESSIN D'UN MOULIN COMME ON LES FAIT EN PROVENCE ET EN DAUPHINÉ, d'après l' <i>Architecture hydraulique</i> de Bélidor.....	238
CHAPELET EMPLOYÉ A MARSEILLE POUR ÉPURER LES EAUX EN UTILISANT LE TRAVAIL DES FORÇATS, d'après l' <i>Architecture hydraulique</i> de Bélidor.....	239
TÉLESCOPE GREGORIEN, d'après le <i>Traité de physique</i> de l'abbé Nollet.....	243
Frontispice de la <i>Mesure du temps</i> de Ferdinand Berthoud (1787).....	245
COMPARATEUR DE FORTIN POUR LA MESURE PRÉCISE DES LONGUEURS, d'après un dessin trouvé dans les papiers de Delambre.....	256
CALORIMÈTRE DE LAVOISIER ET LAPLACE, d'après leur <i>Mémoire sur la chaleur</i> (1780).....	263
BALANCE DE COULOMB.....	276
A.-M. AMPÈRE, d'après un dessin de Boilly.....	285
AUGUSTIN FRESNEL, d'après un portrait de A. Tardieu, gravé par Rosotte.....	298
RENÉ-JUST HAUY, d'après un dessin de Boilly.....	305
VOITURE ORIGINALE A VAPEUR POUR LES ROUTES ORDINAIRES PAR L'INGÉNIEUR MILITAIRE CUGNOT (Conservatoire des Arts et métiers) (1770).....	308
TÉLÉGRAPHE DE CHAPPE, cul-de-lampe.....	318
INAUGURATION DU CHEMIN DE FER DE PARIS A ORLÉANS, le 3 mai 1843, d'après une gravure sur bois.	319
SADI CARNOT à l'âge de dix-sept ans, d'après un portrait de Boilly (1813).....	323
APPAREIL DE DULONG ET ARAGÓ pour la mesure de la force élastique de la vapeur.....	331
REGNAULT, d'après un portrait d'Amaury Duval.....	332
ANTOINE-CÉSAR BECQUEREL.....	343
J.-B.-L. FOUCAULT.....	353
MIROIR TOURNANT DE FOUCAULT POUR LA MESURE DE LA VITESSE DE LA LUMIÈRE.....	355
EDMOND BECQUEREL.....	360
TÉLESCOPE DE FOUCAULT.....	363
LA TOUR EIFFEL.....	374
ZÉNOBE GRAMME.....	380
PLAQUETTE EN L'HONNEUR DE GRAMME, revers, cul-de-lampe.....	390
UN AVION SURVOLANT VERSAILLES, frontispice.....	391
PIERRE CURIE.....	402
L'AVION N° 3 D'ADER (Conservatoire des Arts et métiers), cul-de-lampe.....	418

TROISIÈME PARTIE

HISTOIRE DE LA CHIMIE

LABORATOIRE D'UN ALCHEMISTE, d'après une gravure hollandaise du seizième siècle, frontispice.	421
L'HERMAPHRODITE CHIMIQUE (l'union du soufre et du mercure, le mariage philosophique), d'après une gravure du <i>Viaatorium spagyricum</i> , cul-de-lampe.....	422

HISTOIRE DES SCIENCES EN FRANCE

	Pages.
L'ARRESTATION DE LAVOISIER DANS SON LABORATOIRE, d'après un dessin du temps, frontispice..	423
UNE LEÇON D'ALCHIMIE, d'après une gravure allemande du quatorzième siècle.....	427
LAVOISIER LA VEILLE DE SA MORT, d'après un tableau de la collection Louis David, ayant appartenu à Raspail.....	429
LABORATOIRE DE LAVOISIER (Expérience sur la respiration de l'homme), d'après un dessin de Mme Lavoisier.....	432
GAY-LUSSAC, d'après un dessin de Belliard.....	441
THÉNARD, d'après un dessin de Belliard, lithographie de Delpech.....	445
LE FOUR PERRET SURMONTÉ DE LA TOUR DE GLOVER.....	448
LA TOUR DE GAY-LUSSAC.....	448
VAUQUELIN, d'après un dessin de Belliard.....	455
EX-LIBRIS DE LAVOISIER, cul-de-lampe.....	460
L'ANALYSE CHIMIQUE ORGANIQUE, frontispice.....	461
CHEVREUL, d'après un dessin d'Ambroise Tardieu (1825).....	464
PAYEN.....	466
J.-B. DUMAS, d'après un dessin de Belliard.....	469
A. LAURENT.....	481
GERHARDT.....	483
WURTZ.....	490
CAHOURS.....	495
CUL-DE-LAMPE.....	497
USINE DU LANDY de la Société du gaz de Paris avec ses gazomètres de 150 000 mètres cubes.	499
PASTEUR.....	505
LE BEL.....	506
CUVES DE FERMENTATION DANS LES CAVES DE LA BRASSERIE DES MOULINEAUX.....	517
APPAREIL POUR PROPAGATION DE LEVURE ET OXYGÉNATEUR POUR AÉRATION ET ENSEMENCEMENT (Brasserie des Moulineaux).....	518
FABRICATION DE L'ACIDE CHLORHYDRIQUE (Société des matières colorantes à Saint-Denis).....	530
EXPLOSION D'UN OBUS DE 210, cul-de-lampe.....	544
FABRICATION DU GAZ, frontispice.....	545
BERTHOLLET, d'après une lithographie de Delpech.....	546
SAINTE-CLAIRE DEVILLE.....	548
BERTHELOT.....	559
MOISSAN.....	567
SCHUTZENBERGER, fondateur de l'École de chimie et de physique.....	568
VUE DES USINES DE PERSAN, cul-de-lampe.....	584
VUE DES GRANDES FONDERIES DE PONT-A-MOUSSON, frontispice.....	585
DERNIER FOUR CATALAN AVEC SON PILON, ÉTEINT EN 1921 A ARLES-SUR-TECH, d'après un tableau de Mme Forgemol.....	588
FONDERIE DE PONT-A-MOUSSON. HAUT FOURNEAU DE 600 TONNES, LE PLUS PUISSANT EXISTANT EN 1914 (détérioré par les Allemands).....	589
SÉANCE DE RADIOGRAPHIE CHEZ LE DOCTEUR W. JULIEN.....	597
HENRI BECQUEREL.....	598
MADAME CURIE.....	599
BALANCE DE CURIE, cul-de-lampe.....	610

TABLES

INSTRUMENT PROPRE A OBSERVER LE NIVEAU, d'après une gravure de Le Clerc dans le <i>Recueil des traités de mathématiques de l'Académie royale des sciences</i> (1676), frontispice.....	611
CUL-DE-LAMPE, d'après une gravure de Le Clerc dans le même <i>Recueil</i>	619

TABLE DES MATIÈRES

HISTOIRE DES SCIENCES EN FRANCE

PREMIER VOLUME

INTRODUCTION A L'HISTOIRE DES SCIENCES

PAR

ÉMILE PICARD

SECRÉTAIRE PERPÉTUEL DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES

Pages.

INTRODUCTION.....	I
-------------------	---

HISTOIRE DES MATHÉMATIQUES, DE LA MÉCANIQUE ET DE L'ASTRONOMIE

PAR

HENRI ANDOYER

DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES

ET

PIERRE HUMBERT

PROFESSEUR A L'UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

Pages.

Chapitre premier. — DES ORIGINES A DESCARTES.....	3
---	---

Les mathématiques dans l'antiquité. Pythéas. Rome et les Barbares. Caractères généraux des mathématiques au moyen âge. Les maîtres du treizième et du quatorzième siècle. La Renaissance. Le Collège de France. Viète.

Chap. II. — LES MATHÉMATIQUES PURES DE DESCARTES A CAUCHY.....	23
--	----

I. L'Académie des sciences. Le Journal des Savants. Les Académies étrangères. — II. La géométrie de Descartes et sa correspondance. Fermat. Pascal. Desargues. Roberval. Huygens. — III. Autres savants du dix-septième siècle. — IV. L'analyse infinitésimale. Le début du dix-huitième siècle. — V. Clairaut. D'Alembert. Fontaine. De Gua. Condorcet. Bezout. — VI. Lagrange. Laplace. Monge. Legendre.

Chap. III. — LA MÉCANIQUE ET L'ASTRONOMIE AUX DIX-SEPTIÈME ET DIX-HUITIÈME SIÈCLES....	81
--	----

I. Les débuts de la statique. La géostatique. Fermat. Les débuts de la dynamique. Huygens. Varignon. D'Alembert et son temps. La mécanique analytique. Lagrange. Carnot. — II. Le système de Copernic. Képler. L'abbé Picard. L'Observatoire de Paris. Les Cassini. Les astronomes du dix-huitième siècle. Le problème des parallaxes. La science des longitudes. La figure de la terre. La carte de France. Le système métrique. La mécanique céleste. Laplace. La théorie des marées. Les comètes. La cosmogonie.

Chap. IV. — DE CAUCHY A NOS JOURS.....	125
--	-----

L'Université. L'Ecole polytechnique. Les journaux. — I. Théorie des fonctions. Cauchy. Hermite. Poincaré. — II. Equations et groupes. Galois. — III. Equations différentielles. — IV. Géométrie. Chasles. Poncelet. Darboux. — V. Physique mathématique. Fourier. Lamé. Poisson. — VI. Mécanique, élasticité, mécanique des fluides. — VII. Astronomie. Mécanique céleste. Le Verrier. Géodésie. — VIII. Les tendances contemporaines.

DEUXIÈME PARTIE

HISTOIRE DE LA PHYSIQUE

PAR

CHARLES FABRY

PROFESSEUR A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

Chapitre premier. — LA PÉRIODE ANCIENNE JUSQU'AU DÉBUT DU DIX-SEPTIÈME SIÈCLE.....	167
--	-----

Les éléments dont est fait le développement de la physique. — Difficulté de l'histoire de la physique à ses débuts. — Lien entre la physique, la mécanique et l'astronomie. L'optique. La boussole.

Chap. II. — LE DIX-SEPTIÈME SIÈCLE.....	173
---	-----

I. La physique et le mouvement scientifique au dix-septième siècle. Origine d'une ère nouvelle. Le mouvement scientifique. La correspondance entre savants. L'Académie des sciences et l'Observatoire. — II. Les propriétés des fluides. L'horreur du vide. Blaise Pascal et la pression atmosphérique. La pression dans les liquides. Le vide. Mariotte et la mécanique. Élasticité de l'air. La machine à feu. Papin. — III. L'acoustique. Mouvements vibratoires et art musical. Vitesse de propagation. La mécanique des vibrations. — IV. L'optique au dix-septième siècle. L'optique de Descartes. Le principe de Fermat. Le perfectionnement des lunettes. Instruments de mesure. Naissance de la métrologie. Vitesse de la lumière. Le Traité de la lumière de Huygens.

Chap. III. — LA PHYSIQUE NEWTONIENNE (LE DIX-HUITIÈME SIÈCLE JUSQUE VERS 1780).....	207
---	-----

I. Caractères de cette époque. La physique newtonienne. Peu de faits nouveaux. La physique expérimentale et le grand public. Les bons ouvriers. Application des mathématiques. — II. Les instruments de mesure et les propriétés des corps au dix-huitième siècle. La

TABLE DES MATIÈRES

Pages

mesure du temps. Borda. Instruments pour l'étude des propriétés des corps. — III. L'optique au dix-huitième siècle. L'optique de Newton. La photométrie. Bouguer. — IV. Les débuts de la science de l'électricité et du magnétisme. Période ancienne. Les baromètres lumineux. Recherches de Du Fay. La mode des expériences d'électricité. Nollet. L'expérience de Leyde. Collection de petites découvertes. La foudre. Fin de la période des expériences qualitatives. — V. Le mouvement et la résistance des fluides. Variété des travaux sur cette question. Recherches mathématiques. Architecture hydraulique. Les lois de l'écoulement des fluides. La résistance des fluides. Le frottement interne ou viscosité.

Chap. IV. — LA FONDATION DE LA PHYSIQUE MODERNE (1780-1825)..... 245

I. Le milieu et les hommes. Les écoles techniques et scientifiques. — II. La fondation du système métrique. — III. La chaleur et les propriétés des fluides. La propagation de la chaleur. Fourier. — IV. L'électrostatique et le magnétisme. Coulomb. — V. Le courant électrique. La pile de Volta. L'électromagnétisme et l'école française. Ampère. — VI. Les progrès de l'optique. Fresnel et la théorie de la lumière. Les phares. Conséquences de l'œuvre de Fresnel. — VII. La cristallographie. Romé de Lisle. Haüy. — VIII. Les applications. La machine à vapeur. Les aérostats. La télégraphie optique.

Chap. V. — LA PARTIE MOYENNE DU DIX-NEUVIÈME SIÈCLE (1825-1890)..... 319

I. La fondation de la thermodynamique. L'œuvre de Sadi Carnot. — II. Les propriétés des fluides. Gaz et vapeur. Dulong et Arago. Pouillet, Amagat. — III. La physico-chimie. Les dissolutions. Osmose. — IV. Élasticité et vibrations. Acoustique. V. L'électricité. Les mesures électriques. — VI. Les unités. Le système métrique devient international. — VII. L'optique après Fresnel. Les applications des interférences lumineuses. Spectroscopie. Foucault et le perfectionnement des instruments. — VIII. Les propriétés des cristaux. La théorie moléculaire des cristaux. Bravais. — IX. Les applications. Le grand développement de la machine à vapeur. Les chemins de fer. Le moteur à explosion. Les grandes constructions métalliques. L'électricité et le télégraphe. Le téléphone. Les applications de l'électricité; transport de l'énergie. L'aérostation. L'industrie du froid. La photographie.

Chap. VI. — LA PHYSIQUE CONTEMPORAINE 391

I. L'atomistique. L'énergétique opposée à toute hypothèse. L'atomisme se précise et s'impose. Extension du domaine des radiations. L'éther. L'expérimentation moderne. — II. Les rayons X et la radioactivité. L'électricité dans le vide. Les rayons cathodiques. Découverte des rayons X. Découverte de la radioactivité. Le rayonnement des corps radioactifs. Le radium. Curie. Les rayons X analysés par les cristaux. — III. Les ions dans les gaz et la physique moléculaire. Conductibilité électrique des gaz; expériences anciennes. Les molécules ionisées. Le mouvement brownien et l'agitation moléculaire. — IV. Les propriétés magnétiques des corps. Généralité des propriétés magnétiques. Lois de Curie. Le magnéton. Magnéto-optique. — V. Les applications. L'aviation. Les ondes électromagnétiques et la télégraphie sans fil. — VI. Conclusion.

TROISIÈME PARTIE

HISTOIRE DE LA CHIMIE

PAR

ALBERT COLSON

PROFESSEUR A L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE

Pages.

AVANT-PROPOS	421
Chapitre premier. — LAVOISIER ET LA CHIMIE MINÉRALE.....	423
<i>I. L'alchimie. — II. L'œuvre de Lavoisier : air; eau; méthodes; éléments. Classification minérale. Nomenclature et notation. — III. Impulsion scientifique : recherche d'éléments nouveaux. Lois pondérales. Théorie unitaire de Davy. Atomes de Dalton et lois de Gay-Lussac. Analogies chimiques : isomorphisme et chaleur spécifique. Analyse spectrale. — IV. Action des idées de Lavoisier sur l'industrie : acide sulfurique et industries qui en dérivent. Soude et verre. Chlore et dérivés. Chimie agricole. Outremer. Pierres précieuses.</i>	
Chap. II. — LA CHIMIE ORGANIQUE	461
<i>I. Période de Chevreul. Recherche des espèces organiques. Méthodes diverses : analyse immédiate. Corps gras et méthode des fractionnements. Bougies stéariques. La cellule végétale et ses transformations. Découverte des actions diastases. Analyse élémentaire. — II. L'école atomistique de Dumas. Isomérisie. — A. Phase moléculaire : 1° Classification des métalloïdes par Dumas. Sa méthode et ses principes. Notion moléculaire; 2° Fonctions chimiques; 3° Radicaux; 4° substitutions. — B. Retour aux atomes : notions doctrinales. Rôle de Laurent, son œuvre. Gehhardt; ses débuts; définition de l'atome : 1° homologues; 2° théorie des types; 3° extension des substitutions aux radicaux. Conception générale des radicaux. — C. Réalisation systématique des théories atomistiques : Wurtz et son œuvre. — D. Les extensions de Regnault et de Cahours.</i>	
Chap. III. — LES MÉTHODES PARTICULIÈRES	499
<i>A. I. Synthèses et réactions de Berthelot. — II. Pasteur et l'isomérisie optique. Interprétation stéréochimique. Applications. — III. Pasteur et les méthodes biologiques. Culture des ferments. Mécanisme des fermentations : diastases. Applications. Fixation de l'azote par les plantes. — B. I. Série aromatique ou cyclique. La benzine et ses homologues. Polymérisation. Fonctions par influence. Migration. — II. La grande industrie organique. Gaz d'éclairage. Matières colorantes. Parfums. Térébenthine et camphres. Résines et caoutchouc. Médicaments; fonctions diverses. Poudres de guerre et fibres textiles. Colloïdes. Matières albuminoïdes ou protéiques.</i>	
Chap. IV. — MÉCANIQUE CHIMIQUE	545
<i>I. La statique de Berthelot. Équilibres hétérogènes. Équilibres homogènes : procédé Claude. Règle des phases. Sens des réactions et solubilité. Dissolutions saturées et étendues. — II. Thermochimie. Lois générales; utilisations. — III. Orientations nouvelles. Liquéfaction des gaz. Classification des éléments; Principe de Mendéléeff. Hypothèse de Prout. — IV. La chimie des hautes températures : Moissan, le four électrique et ses applications. L'électrolyse des corps fondus : application à la métallurgie de l'aluminium et des métaux alcalins. L'électrolyse des corps dissous. Ruolz. Chlorates. Potasse électrolytique. — V. La chimie des complexes ou composés moléculaires. Les cobaltamines et la réaction de la chimie organique sur la chimie minérale. Dualisme et catalyse. Extension des résultats synthétiques.</i>	

TABLE DES MATIÈRES

	Pages.
Chap. V. -- LA MÉTALLURGIE ET SES MÉTHODES	585
<i>I. Le fer, la fonte et l'acier. Méthodes d'investigation de M. Osmond. Fonte aciérée : procédé Prache. — II. La métallurgie du cuivre.</i>	
Chap. VI. — LA CHIMIE DES CORPS RADIOACTIFS.....	597
<i>I. Matière radiante. Expériences de H. Becquerel. Radium; extraction et propriétés. L'émanation et ses propriétés. Similitude des rayonnements de l'ampoule de Crookes et du radium. Constatations de M. Rutherford et l'unité de la matière. Nombres atomiques, isotopie. Conclusion.</i>	
TABLE DES ILLUSTRATIONS	611
TABLE DES MATIÈRES.....	615



PARIS
TYPOGRAPHIE PLON-NOURRIT ET C^{ie}
8, rue Garancière

[illegible]

PRINTED IN	U. S. A.
------------	----------



CAT. NO. 23233

DC 38 .H3 v.14
Hanotaux, Gabriel, 1853-
Histoire de la nation française
010101 000



0 1163 0215899 7
TRENT UNIVERSITY

DC38 .H3 v.14

Hanotaux, Gabriel

...Histoire de la nation
française...

DATE

ISSUED TO

9333

